

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## BIODYNAMICKÉ OSVĚTLENÍ

BIODYNAMIC LIGHTING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Andruška

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Martin Andruška

**ID:** 195566

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Biodynamické osvětlení

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete biodynamické LED osvětlení. Zaměřte se na možnost snímání okolních světelných podmínek a zařízení navrhnete.

Navrhnete koncepci svítidla s možností nastavování teploty bílé barvy, návrh realizujte a ověřte jeho funkčnost.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fajcik, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca je zameraná na návrh a realizáciu biodynamického svietidla s nastaviteľnou bielou určeného do interiéru schopného produkovať užívateľom definované svetlo alebo simulovať podmienky prirodzeného osvetlenia automaticky. Práca popisuje fyziologické základy citlivosti človeka na osvetlenie a z toho vyplývajúce dôsledky a tiež spôsob fungovania polovodičových zdrojov žiarenia. Na záver sa zaoberá metódou snímania externého osvetlenia a popisom návrhu funkcie prvkov systému a finálnou realizáciu.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Biodynamické osvetlenie, tunable white, LED, cirkadiánny rytmus, melanopsín, ipRGC

## **ABSTRACT**

This master thesis is focused on designing a concept of a biodynamic tunable white luminaire for the interior capable of producing user defined output or simulating the conditions of natural exterior lighting. The thesis describes the physiological basis of human sensitivity to lighting and the consequences, as well as the principles of semiconductor radiation sources. Finally, it deals with methods of sensing the lighting conditions and describing the design and functions of the system elements and final implementation.

## **KEYWORDS**

Biodynamic lighting, tunable white, LED, circadian rhythm, melanopsin, ipRGC



ANDRUŠKA, Martin. *Biodynamické osvětlení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2021, 71 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Bc. Martin Andruška  
**VUT ID autora:** 195566  
**Typ práce:** Diplomová práca  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečnéj práce:** Biodynamické osvětlení

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....  
.....  
podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za rady, pomoc, podnety k vypracovaniu diplomovej práce a vedenie odborných konzultácií o riešenej problematike. Ďakujem Ing. Lukášovi Novákovi za ochotu, odborné konzultácie a výpomoc pri návrhu a realizácii výsledkov práce.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Teoretická časť</b>	<b>11</b>
1.1 Anatómia cirkadiálneho systému . . . . .	11
1.1.1 Centrálné biologické hodiny . . . . .	11
1.1.2 Zrak a biologické fotoreceptory . . . . .	12
1.2 Vplyv osvetlenia na človeka . . . . .	13
1.2.1 Produktivita a reakčný čas . . . . .	15
1.3 Teória osvetlenia a technológie . . . . .	16
1.3.1 Spektrálne zloženie slnečného svetla . . . . .	16
1.3.2 Planckov a Wienov zákon . . . . .	16
1.3.3 Farebný priestor a CIE-xy . . . . .	17
1.3.4 Korelovaná farebná teplota . . . . .	19
1.4 Charakterizácia svetelného zdroja . . . . .	20
1.5 Technológie . . . . .	21
1.6 Elektroluminiscenčné diódy . . . . .	22
1.6.1 InGaN LED . . . . .	23
1.6.2 LED so sekundárnou luminiscenciou . . . . .	23
<b>2 Postup riešenia</b>	<b>26</b>
2.1 Porovnanie snímačov osvetlenia . . . . .	26
2.2 Konštrukcia snímacieho modulu . . . . .	28
2.2.1 Solárne napájanie snímacieho modulu . . . . .	28
2.2.2 Nabíjací obvod akumulátoru . . . . .	28
2.2.3 Napájanie snímacieho obvodu s XBee 3 . . . . .	30
2.3 Konštrukcia svietidla . . . . .	31
2.3.1 Výber luminiscenčných diód . . . . .	31
2.3.2 Napájanie obvodu . . . . .	31
2.3.3 Regulovateľný zdroj prúdu LED s ILD8150 . . . . .	32
2.3.4 Teplotný management . . . . .	37
2.3.5 Riadiaci obvod svietidla . . . . .	38
2.3.6 Detektor prítomnosti . . . . .	39
2.3.7 Komunikačný modul svietidla . . . . .	39
<b>3 Realizácia</b>	<b>41</b>
<b>Záver</b>	<b>50</b>

<b>Literatúra</b>	<b>52</b>
<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>56</b>
<b>Zoznam príloh</b>	<b>58</b>
<b>A Schémy</b>	<b>60</b>
A.1 Schéma zapojenia snímacieho modulu . . . . .	60
A.2 Schéma zapojenia riadiaceho obvodu . . . . .	61
A.3 Schéma zapojenia LED . . . . .	62
<b>B Podklady na výrobu DPS</b>	<b>63</b>
B.1 Snímací modul - TOP, M1:1 . . . . .	63
B.2 Snímací modul TOP - osadzovací plán . . . . .	63
B.3 Snímací modul - BOT, M1:1 . . . . .	64
B.4 Svietidlo - TOP, M1:1 . . . . .	65
B.5 Svietidlo TOP - osadzovací plán . . . . .	66
B.6 Svietidlo - BOT, M1:1 . . . . .	67
B.7 Svietidlo - BOT - osadzovací plán . . . . .	68
<b>C Zoznamy súčiastok</b>	<b>69</b>
C.1 Zoznam súčiastok - snímací modul . . . . .	69
C.2 Zoznam súčiastok - svietidlo . . . . .	70
<b>D Výpis z serveru</b>	<b>71</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Denné cykly v tele človeka [1] . . . . .	11
1.2	Anatómia sietnice a citlivosť fotoreceptorov [2] . . . . .	13
1.3	Porovnanie citlivosti čapíkov a ipRGC [1] . . . . .	14
1.4	Porovnanie reakčných časov pri odlišnej teplote a intenzite [5] . . . . .	15
1.5	Spektrum žiarenia slnka nad zemskou atmosférou a na úrovni mora, absorpčné oblasti molekúl atmosféry [6] . . . . .	16
1.6	Planckovo vyžarovanie čierneho telesa a Wienov posuv $\lambda_{max}$ [7] . . . . .	17
1.7	Diagram CIE-xy a Planckian locus [9] . . . . .	18
1.8	Váhové funkcie (CIE 2° standard observer), hodnoty funkcií 1931 a 2012 [8] . . . . .	19
1.9	Pásový model LED [13] . . . . .	23
1.10	Rez fosforom, proces transformácie žiarenia [13] . . . . .	24
1.11	Vplyv transformačného pomeru na výsledné spektrum [14] . . . . .	25
2.1	Porovnanie citlivosti TCS3472 (vľavo) a TCS3200 (vpravo) [15], [16] . . . . .	27
2.2	Schéma zapojenia TC4056A . . . . .	29
2.3	Schéma zapojenia ochrany akumulátoru DW01A a regulátoru LP3990MF- 3.3 . . . . .	30
2.4	Schéma zapojenia konektoru a regulátoru riadiacej časti LDL1117 . . . . .	32
2.5	Hybridná kombinácia a plynulý prechod regulácie CCR a PWM [26] . . . . .	33
2.6	Hysteréza spínania a analógová regulácia prúdu záťaže [26] . . . . .	34
2.7	Hysteréza spínania a analógová regulácia prúdu záťaže [26] . . . . .	34
2.8	Schéma zapojenia znižujúceho regulátoru prúdu ILD8150 pre teplú bielu . . . . .	36
2.9	Schéma sériovo-paralelného zapojenia LED kanálov . . . . .	37
2.10	Teplotná simulácia vo Fusion 360 s vrstvou medi . . . . .	38
3.1	Hotový panel dosiek plošných spojov, spodná strana . . . . .	41
3.2	Výrez v medi pre mikrovlnný detektor prítomnosti . . . . .	42
3.3	Pretavenie vrchnej strany súčiastok DPS s osadenými LED . . . . .	42
3.4	Spodná strana DPS s LED . . . . .	43
3.5	Vrchná strana DPS so súčiastkami . . . . .	44
3.6	Snímok DPS z termokamery spodná strana LED . . . . .	45
3.7	Snímok DPS z termokamery vrchná strana . . . . .	45
3.8	Snímací modul bez vrchného krytu . . . . .	46
3.9	Snímací modul s krytom . . . . .	47

# Úvod

Cieľom práce je realizovať svetelnú jednotku určenú do interiéru budov alebo domácností so zameraním na prirodzenosť a fyziológiu človeka. Moderné osvetlenie hlavne interiérov domácností by malo vykazovať určitú úroveň biodynamickosti, to znamená dynamickú zmenu charakteristických vlastností produkovaného žiarenia na základe svetlom stimulovaných fyziologických procesov človeka, a teda určitú svetelnú simuláciu pobytu človeka v prirodzených podmienkach slnkom osvetleného exteriéru.

Oheň ako symbol bezpečia už od praveku poskytoval ľuďom možnosť efektívne vidieť a pracovať aj po západe slnka, dnes si človek umelo a častokrát nadbytočne osvetľuje miesto svojho pobytu vo večerných hodinách, nevhodný zdroj svetla môže mať za následok narušenie spánkového režimu. Denná doba spánku a bdlosti je súčasťou 24-hodinového cyklu zvaného cirkadiánnny rytmus, ktorý sa synchronizuje pomocou zrakom vnímaných stimulov. Cirkadiánnny rytmus sa úplne zmeniť nedá nakoľko je daný geneticky, je možné ho však vhodným osvetlením fázovo regulovať a dopomáhať tým správnej regulácií tvorby hormónov tak, aby bola centrálna nervová sústava schopná efektívne fungovať cez deň a regenerovať telo počas spánku v noci [1].

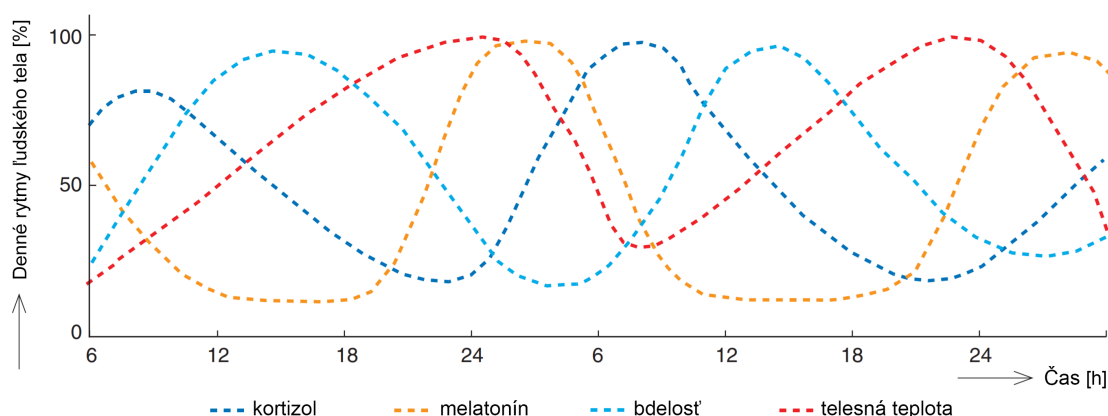
Biodynamické osvetlenie so správnym spektrálnym zložením podporujúcim denné aktivity a večernú prípravu tela na regeneráciu môže významne pozitívne ovplyvniť kvalitu života človeka, a je teda motiváciou k návrhu a realizácii takejto osvetľovacej jednotky rozoberanej v tejto práci.

# 1 Teoretická časť

Pre hlbšie pochopenie správneho prístupu k tvorbe umelého osvetlenia určeného pre ľudí, je nutné preskúmať fotocitlivé fyziologické procesy, ktoré môžu byť v prípade nevhodného osvetlenia nežiadúce. Je preto nutné zaistiť, aby bol dopad osvetlenia na človeka pozitívny a prirodzený.

## 1.1 Anatómia cirkadiálneho systému

Evolúcia živých organizmov pod vplyvom striedajúcich sa dní, nocí a ročných období viedla k vzniku určitého biologického režimu riadeného práve svetlom. V rámci výskumu prírodných časových režimov bol v 50-tych rokoch 20. storočia prvý krát spomenutý cirkadiánnny rytmus. Názov je odvodený z latinského circa – okolo a dies – deň. Je to pomenovanie pre geneticky definovaný 24-hodinový cyklus zmien v organizme, stimulovaný teplotou prostredia a dobou aj charakterom osvetlenia počas dňa [1].



Obr. 1.1: Denné cykly v tele človeka [1]

### 1.1.1 Centrálné biologické hodiny

Hypotalamus centrálnej nervovej sústavy obsahuje v oblasti kríženia zrakových nervov suprachiazmatické jadrá SCN (z angl. Suprachiasmatic Nuclei) fungujúce ako biologické hodiny na princípe genetického molekulárneho oscilátoru. SCN riadi (ovplyvňuje) napríklad telesnú teplotu, hladiny hormónov a kedy prichádza spánok alebo aktivita. Aktuálny stav (obrázok 1.1) je závislý na základe produkcie dvoch hormónov, spánkový melatonín prevládajúci večer navodzuje spánok a regeneráciu tela, naopak stresový hormón kortizol organizmus nabudí, podporuje aktivitu a pohyb [1]. Pomer



týchto hormónov riadi SCN, ktorý je stimulovaný informáciami z retinohypotalamickeho traktu, čím vzniká priama spojitosť medzi vnímaným osvetlením a stavom organizmu. Biologické hodiny sa tak dokážu prirodzene resetovať a aktualizovať podľa svetla, kedy začína a končí deň. Súvislosť tvorby melatonínu a biologických hodín objavila česká fyziologička Prof. RNDr. Helena Illnerová, DrSc, pri výskume vplyvu zmeny osvetlenia počas ročných období na tvorbu melatonínu u potkanov [1].

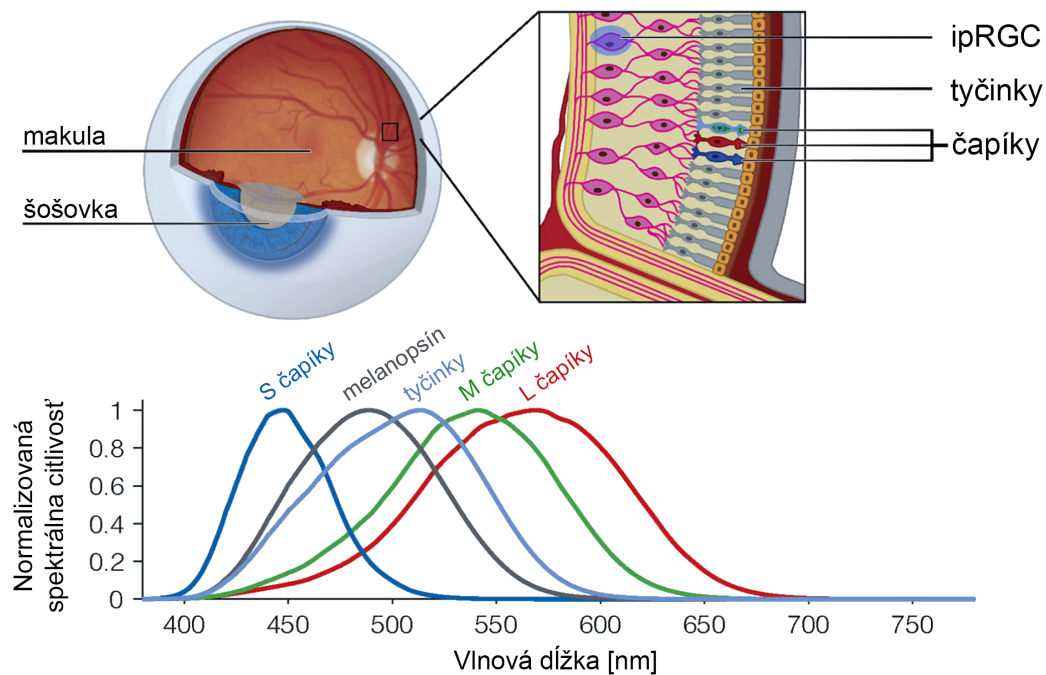
### 1.1.2 Zrak a biologické fotoreceptory

Za optickou sústavou ľudského zrakového orgánu – oka sa nachádza sietnica, aktívny prevádzkač svetla na biologické signály. Fotoreceptory poskytujúce videnie a priame vnímanie svetla rozmiestnené na sietnici sa rozdeľujú na dve základné kategórie – tyčinky a čapíky [2].

Rozlišujú sa 3 druhy čapíkov podľa spektrálnej oblasti citlivosti, modré S-čapíky, zelené M-čapíky a červené L-čapíky. S, M, L značí skratku vlnovej dĺžky (z angl. Short, Medium, Long). Vďaka nim sa generuje fotopické farebné videnie pravdepodobne pomocou pomeru týchto troch základných farieb [2].

Tyčinky majú homogénnu spektrálnu citlivosť, nepodielajú sa na farebnom videní, rozlišujú iba množstvo fotónov, respektíve skotopické videnie. V nedostatočnom osvetlení čapíky prestávajú pracovať a človek nerozlišuje farby, vidí v podstate čiernobielo pomocou tyčínok [2].

Sietnicové gangliové bunky integrujú informácie od fotoreceptorov cez bipolárne bunky a signál posielajú do zrakového nervu [2]. V roku 2007 sa u človeka objavil nový druh fotoreceptoru, intrinzicky fotocitlivé sietnicové gangliové bunky uvádzané pod skratkou ipRGC (z angl. intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells). Niektoré sietnicové gangliové bunky sú teda fotocitlivé, obsahujú farbivo melanopsín s maximom citlivosti v oblasti vlnovej dĺžky 480 nm. Nachádzajú sa rovnomerne rozptýlené po celej sietnici s hustejším zastúpením v dolnej časti, spolu s ich reakciou primárne na modré spektrum sa získali dva argumenty tvrdenia, že ipRGC slúžia na detekciu modrej dennej oblohy, je teda možné ich považovať za špecializovaný cirkadiánný detektor [1], [2].



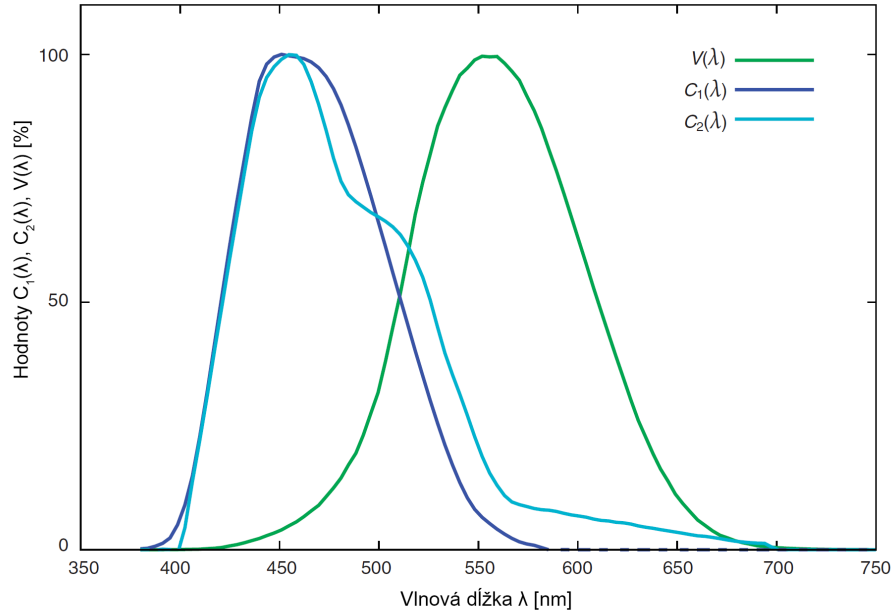
Obr. 1.2: Anatómia sietnice a citlivosť fotoreceptorov [2]

Na všetky fotoreceptory dopadajú fotóny filtrované cez optický aparát oka, určitá zložka krátkovlnného modrého spektra sa tým prirodzene odfiltruje. S vekom sa efekt zosilňuje a tým klesá sietnicou prijímaná intenzita krátkovlnného svetla potrebná pre melanopsín v ipRGC a pre čapíky, aby prebiehala dostatočná stimulácia SCN a teda časovanie cirkadiálneho režimu [2].

## 1.2 Vplyv osvetlenia na človeka

Priebeh prirodzeného Slniečného osvetlenia povrchu Zeme počas dňa sa mení striedaním ročných období, rytmus je teda ovplyvňovaný krátkodobými dennými aj dlhodobými zmenami osvetlenia. Denný vplyv svetla na cirkadiánný fázový posuv má dozimetrický charakter, dávky sa počas 24 hodinového cyklu sčítavajú. Pokiaľ svetlo obsahuje správne spektrum, krátkodobé záblesky vysokej intenzity môžu spôsobiť väčší cirkadiánný fázový posuv ako mierna expozícia po dlhšiu dobu. Akumulovaná stimulácia sa integruje v čase. Fázový posun reaguje hlavne na spektrálnu oblasť melanopsínu, predpokladá sa preto, že ipRGC bunky majú hlavný efekt pri nastavení biologických hodín [2]. Na stimulácii SCN pre časovú synchronizáciu cirkadiálneho rytmu sa podieľajú ipRGC aj čapíky, spektrálna citlivosť fotoreceptorov sa však odlišuje. Na obrázku 1.3 sú znázornené možné spektrálne priebehy citlivosti

fotoreceptorov videnia ( $V_{(\lambda)}$ ) a cirkadiálneho detektoru ipRGC ( $C_{(\lambda)}$ ) pri dlhodobom  $C_{1(\lambda)}$  a krátkodobom  $C_{2(\lambda)}$  pôsobení svetla s následkami fázového posunu cyklu a potlačania tvorby melatonínu [1].

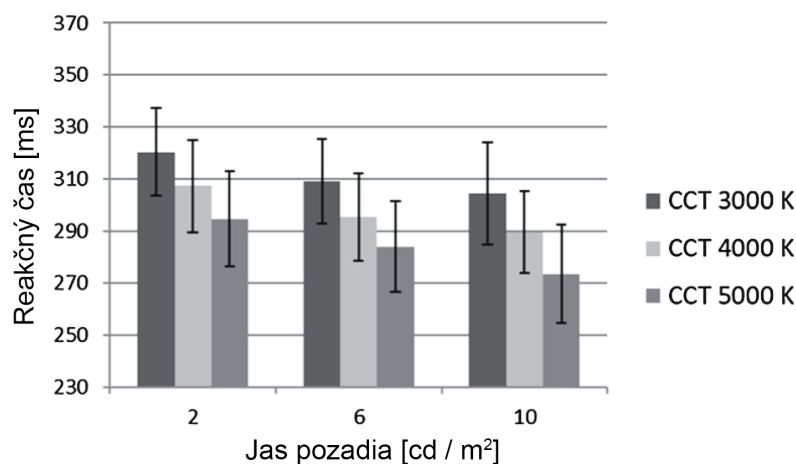


Obr. 1.3: Porovnanie citlivosti čapíkov a ipRGC [1]

S použitím úzkopásmového žiarenia v oblasti vlnovej dĺžky 460 nm a 555 nm bola zistená odlišná doba efektu potlačenia tvorby melatonínu [3]. Pri 555 nm žiarení sa cirkadiánna zmena uplatní aj pri krátkej a slabej expozícii, efekt však časom oslabuje aj pri konštantnej expozícii, zmenu vyvolajú hlavne vizuálne fotoreceptory zraku, ktorých spojená maximálna spektrálna citlivosť je zhodná s vlnovou dĺžkou použitého žiarenia. Modré žiarenie vlnovej dĺžky 460 nm registrujú primárne ipRGC, efekt trvá po celú dobu expozície a má dlhodobejšie následky. Spoľahlivo mapovať osvetlenie počas celého cirkadiálneho cyklu tak dokážu práve ipRGC, riadiace sa intenzívnym modrým svetlom. U ľudí s nefunkčnými vizuálnymi fotoreceptormi sa nevyskytuje krátkodobé potlačenie melatonínu a proces nereaguje na svetlo v spektrálnej oblasti 555 nm, čapíky ani tyčinky gangliovým bunkám nepredávajú žiadne informácie, ich SCN sa orientuje výhradne podľa vlastnej citlivosti ipRGC. Pri slabej intenzite má 555 nm žiarenie väčší efekt na fázový posun než 460 nm, ako pri potláčaní tvorby melatonínu, tak pri posúvaní cirkadiánnej fázy, čapíky zpočiatku dopomáhajú vyvolávať zmeny už pri krátkej a slabej expozícii, melanopsín reaguje na dlhšie a intenzívnejšie expozície [3].

### 1.2.1 Produktivita a reakčný čas

Zvýšenie intenzity osvetlenia pracovných priestorov z 300 lux na 2000 lux dokáže za určitých podmienok v metalurgickom priemysle zlepšiť produktivitu práce o 15 až 20 % a to vďaka vyššiemu pracovnému výkonu a menšiemu počtu vyradených kusov z výroby [4]. Experiment zisťujúci efekt korelovanej farebnej teploty zdroja svetla na reakčný čas 54 testovaných subjektov pre účely osvetlenia cestných tunelov ukázal schopnosť rýchlejšej reakcie človeka na dej osvetlený žiarením s vyšším podielom modrého spektra. Reakcie všetkých variant teploty zlepšuje vyšší jas, úlohu v reakčnom čase môže zohrávať aj index podania farieb [5].



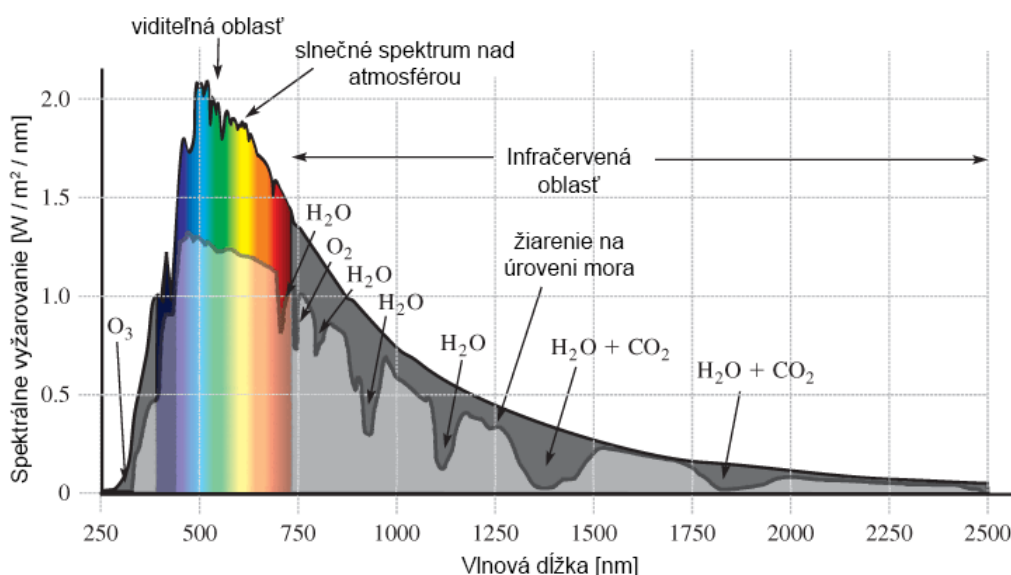
Obr. 1.4: Porovnanie reakčných časov pri odlišnej teplote a intenzite [5]

## 1.3 Teória osvetlenia a technológie

Ak sa žiarenie svietidla javí pozorovateľovi bielo alebo teplotne sympatické, nemusí to vypovedať o plnom alebo efektívnom spektrálnom zložení, v nevhodnú dobu počas dňa sa tak zrak človeka môže vystaviť negatívnym a neprirodzeným svetelným faktorom. V nasledujúcich kapitolách budú priblížené skutočnosti definujúce vlastnosti svetelných zdrojov, ktoré je potrebné pri realizácii svietidiel zohľadňovať.

### 1.3.1 Spektrálne zloženie slnečného svetla

Slnko je primárny zdroj svetla celej slnečnej sústavy, na každej planéte s atmosférou bude mať jeho žiarenie odlišné spektrálne zloženie z fyzikálnych príčin. Nad zemskou atmosférou sa dá spektrálne vyžarovanie slnka prirovnávať k Planckovmu ekvivalentu čierneho telesa teploty 5770 K, názorné porovnanie na obrázku 1.5 a 1.6 [6].



Obr. 1.5: Spektrum žiarenia slnka nad zemskou atmosférou a na úrovni mora, absorpčné oblasti molekúl atmosféry [6]

Fotosféra slnka má v skutočnosti teplotu v rozsahu približne 4000 K až 6500 K. Hviezdy majú nízku odrazivosť a oproti bežným látkam skutočne veľmi blízko reprezentujú Planckovu charakteristiku vyžarovania čierneho telesa, vďaka tomu sú tieto zákony využívané pri fotometrii hviezd [7].

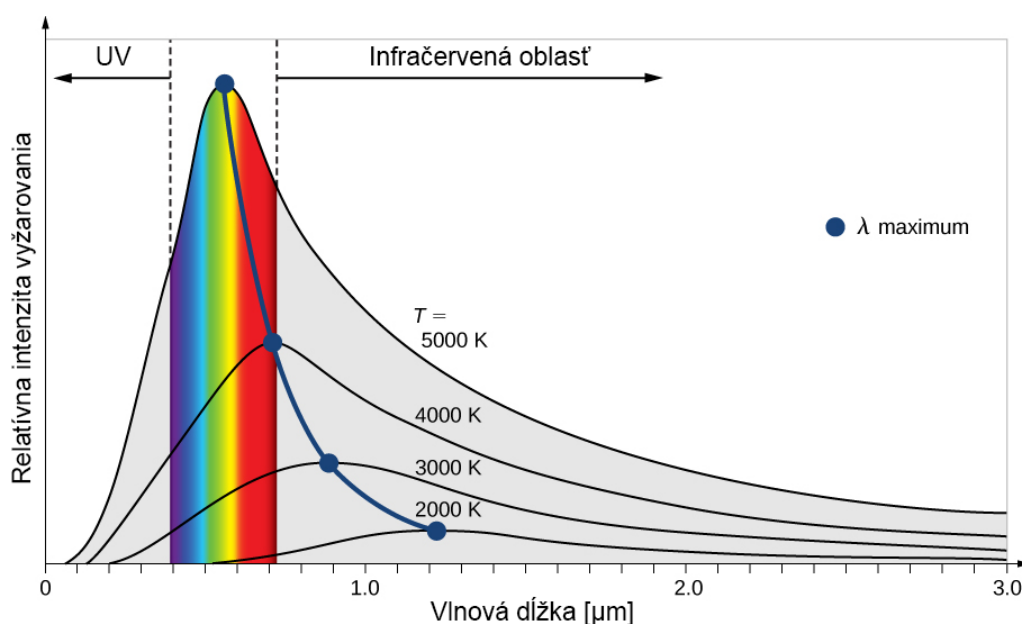
### 1.3.2 Planckov a Wienov zákon

Každé teleso emituje elektromagnetické žiarenie úmerné teplote povrchu telesa pokiaľ nie je zdrojom aj iný dej. Pri teplotách rádovo stoviek Kelvinov je to obvykle

len tepelné infračervené vlnenie, s rastúcou teplotou sa vyžarované spektrum posúva do oblasti vyšších frekvencií až viditeľného spektra. Spektrálne rozloženie intenzity  $I$  sa dá modelovať vzťahom [7]:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T} - 1)} \quad (1.1)$$

kde  $\lambda$  je súradnica vlnovej dĺžky intenzity,  $T$  je teplota telesa,  $h$  je Planckova konštanta,  $c$  rýchlosť svetla vo vákuu a  $k_B$  je Boltzmannova konštanta. Wienov zákon posunu vlnovej dĺžky maxima vyžarovanej intenzity  $\lambda_{max}$  umožňuje približne určovať teplotu zdroja žiarenia napríklad pri charakterizácii hviezd, pretože každá teplota má definovanú hodnotu  $\lambda_{max}$ . Túto závislosť spolu s Planckovým rozložením intenzity znázorňuje obrázok 1.6 [7].



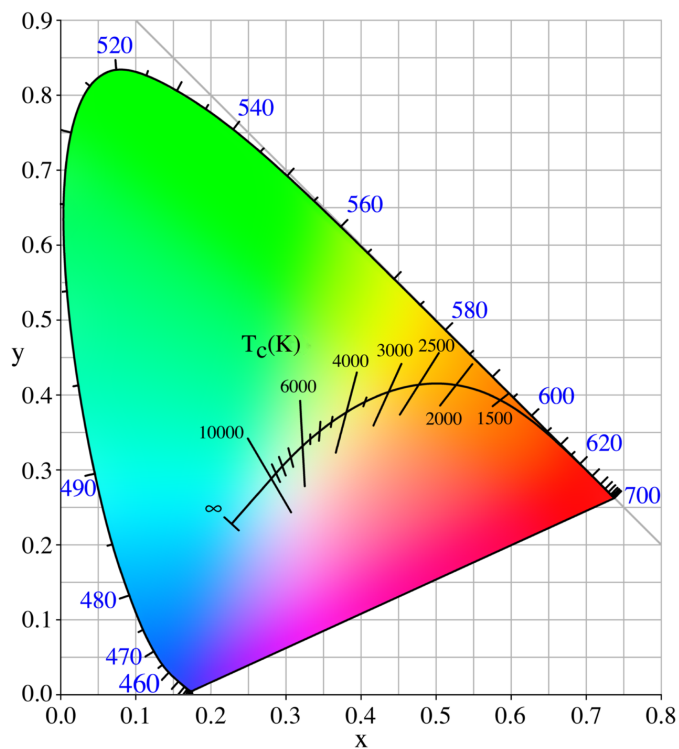
Obr. 1.6: Planckovo vyžarovanie čierneho telesa a Wienov posuv  $\lambda_{max}$  [7]

### 1.3.3 Farebný priestor a CIE-xy

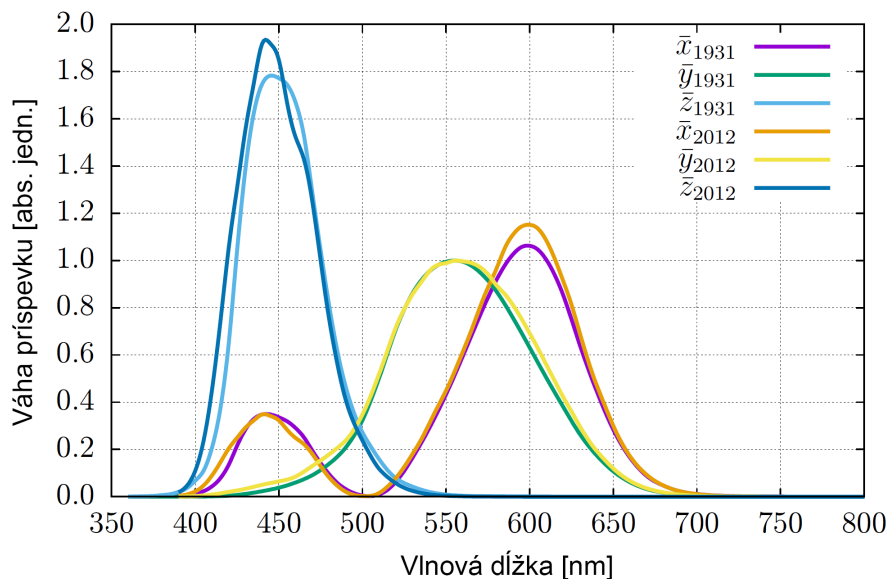
Porovnávanie farieb je pre človeka subjektívne a relatívne, na definíciu farebnej hodnoty bolo v minulosti vytvorených niekoľko farebných priestorov, CIE-xy diagram na obrázku 1.7 reprezentuje rozsah farieb vnímaných ľudským okom, ostatné farebné priestory sa obvykle nachádzajú vo vnútri diagramu človekom vnímaných farieb a majú menší rozsah, na prevod hodnôt medzi priestormi je nutná transformácia.

Na reprezentáciu ľudského vnímania farieb slúžia váhové funkcie CIE 1931  $2^\circ$ , uhol znamená vnímanie stimulu fotoreceptormi zraku v okolí zhruba  $2^\circ$  od osy oka,

oblasť zvaná tiež žltá škvrna. Medzinárodná komisia pre osvetľovanie CIE (Commission internationale de l'Eclairage) definovala štandardizovaný model váhových funkcií hodnôt farebných stimulov vnímaných ľudským okom znázornený na obrázku 1.8 [8].



Obr. 1.7: Diagram CIE-xy a Planckian locus [9]



Obr. 1.8: Váhové funkcie (CIE 2° standard observer), hodnoty funkcií 1931 a 2012 [8]

Koordináty X, Y a Z odpovedajú hodnotám detektoru s citlivosťou ekvivalentnou váhovým funkciám CIE 1931 2° štandardného pozorovateľa. Súradnice CIE-xy sa získavajú z koordinátov X, Y a Z nasledovne podľa [10]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1.2)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

### 1.3.4 Korelovaná farebná teplota

Planckov zákon popisujúci vyžarovanie telesa určitej teploty sa v praxi využíva na popis zdanlivej teploty svetelného zdroja, ak jeho vyžarovanie obsahuje spektrum podobné teplotnému žiareniu. Určité farebné súradnice CIE-xy diagramu sa dajú potom priradiť korelovanej farbe k danej teplote, táto Planckovská krivka s teplotnými čiarami je vykreslená v diagrame na obrázku 1.7. Aproximácia korelovanej farebnej teploty CCT (z angl. Correlated Color Temperature) podľa chromatických koordinátov x a y priestoru CIE 1931 definuje McCamyho (1991) rovnica [10]:

$$n = \frac{x - 0,3320}{0,1858 - y} \quad (1.3)$$

$$CCT_{(x,y)} = 449n^3 + 3525n^2 + 6823n + 5520$$



Analyzovaný spektrálny rozsah z ktorého koordináty CIE-xy pochádzajú musí byť pri aplikácii McCamyho prepočtu zmysluplne obsiahnutý pod uvažovanou Planckovou teplotnou krivkou, prepočet samotného monochromatického žiarenia nebude mať žiadnu výpovednú hodnotu [10].

## 1.4 Charakterizácia svetelného zdroja

Každý zdroj svetla má určité parametre definujúce jeho predispozície pre rôzne aplikácie. V tejto kapitole budú uvedené vlastnosti využiteľné pri návrhu zdroja osvetlenia prispôbeného potrebám človeka.

### Svetelný tok

Na charakterizáciu množstva svetla užitočného pre človeka sa používa svetelný tok značený  $\phi_V$  v jednotkách lúmen [lm]. Udáva ekvivalent výkonu žiarenia uplatneného pri videní, teda v oblasti spektrálnej citlivosti fotoreceptorov zraku človeka. Zdroj svetla produkujúci len žiarenie mimo viditeľné spektrum bude bez ohľadu na výkon produkovať 0 lúmenov [11].

### Intenzita osvetlenia

Svetelný tok  $\phi_V$  [lux] dopadajúci na plochu  $S$  bude vytvárať určitú mieru osvetlenia s intenzitou  $E$  udávanou v jednotkách lux. Zdroj svetla produkuje úroveň toku lúmenov, teleso osvetľované týmto zdrojom prijíma viditeľné žiarenie v miere luxov. Na meranie intenzity dopadajúceho svetla sa používa luxmeter [11].

$$E = \frac{d\phi_V}{dS} \quad (1.4)$$

### Merný svetelný výkon

Účinnosť  $K$  [lm/W] premeny elektrickej energie na svetelné žiarenie definuje merný výkon ako počet lúmenov na jeden watt príkonu  $P$  spotrebovanej energie podľa rovnice [11]:

$$K = \frac{d\phi_V}{P} \quad (1.5)$$

## **Index farebného podania**

Korektné vnímanie farieb je závislé od prítomného spektra žiarenia, schopnosť danej spektrálnej charakteristiky zdroja svetla poskytnúť potrebné svetlo sa značí indexom farebného podania CRI (z angl. Color Rendering Index). Udáva sa v intervale 0 až 100. Určuje sa porovnávaním uvažovaného zdroja svetla s kalibrovaným referenčným zdrojom [11].

## **Hygiena**

Hygiena svetelných zdrojov zahŕňa všetky nežiadúce priame či vedľajšie účinky zdroja žiarenia na ľudský organizmus. Môže sa jednať o škodlivé ultrafialové žiarenie poškodzujúce DNA, nadmernú intenzitu viditeľného alebo infračerveného spektra a pod. Žiarenie môže tiež sekundárne vyvolávať v okolitých látkach chemické reakcie uvoľňujúce plyny a podobne. Za nehygienické môže byť označené aj napríklad osvetlenie neposkytujúce v danom priestore dostatočnú osvetlenosť [11].

## **1.5 Technológie**

Zdroj svetla využívajúci prevod elektrickej energie na svetlo je možné realizovať niekoľkými spôsobmi, od ich samotného vzniku boli tieto technológie postupne zdokonaľované prípadne nahradené novšími a efektívnejšími. Základné rozdelenie zdrojov sa dá kategorizovať na teplotné, výbojové a luminiscenčné v závislosti na fyzikálnej podstate vyžarovania.

### **Teplotné žiarenie**

Teplotné žiarenie sa riadi Planckovým zákonom vyžarovania, je úmerné teplote povrchu látky. Klasická alebo napríklad halogénová žiarovka využíva prechod elektrického prúdu vodivým vláknom, ktoré má určitý odpor a teda tepelné energetické straty ho zohrievajú, následkom toho vyžaruje približne Planckovo spektrum úmerné ustálenej pracovnej teplote. Materiál vlákna je obvykle wolfrám s vysokou teplotou topenia 3300 °C a pomalým procesom odparovania pri vysokých teplotách. Prvé prakticky využiteľné realizácie žiarovky s uhlíkovým odporovým vláknom ako elektrického zdroja svetla z roku 1879 sú pripísané Thomasovi Edisonovi [11].

### **Výbojkové žiarenie**

Výbojkové žiarenie nastáva pri zrážke katódou emitovaného elektrónu s atómom plynu látky v elektrickom výboji. Absorbovaná kinetická energia sa premení na vyššiu - exci-

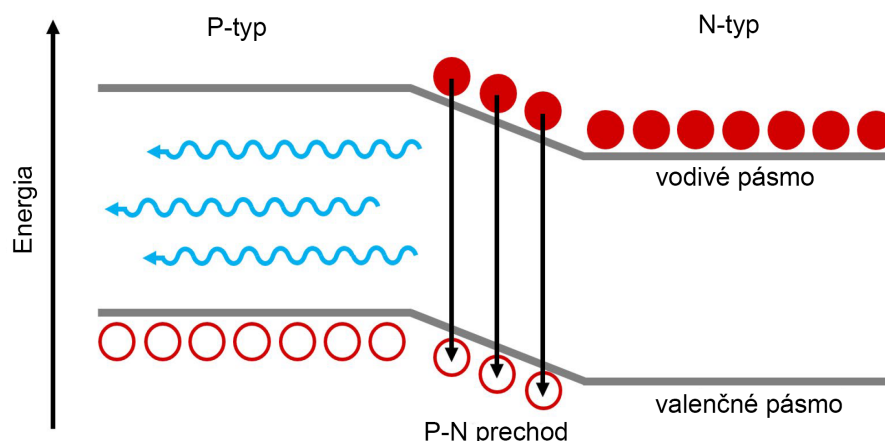
tovaný energetický stav elektrónu daného atómu, z dôvodu nestability sa elektrón vráti do pôvodnej energetickej hladiny a energiu uvoľní v podobe vyžiareného fotónu vlnovej dĺžky definovanej energetickým stavom. Druh výboju a množstvo energetických stavov danej látky vyvolávajúcich vyžarovanie tak definuje počet a rozloženie spektrálnych čiar výbojového žiarenia. Napríklad priehľadná nízkotlaková ortuťová výbojka produkuje dominantné spektrálne čiary v oblasti 253,7 nm a 185 nm ultrafialového žiarenia mimo viditeľné spektrum. Interiérové fluorescenčné žiarivky využívajú sekundárnu emisiu z luminoforu naneseného na vnútornej stene trubice, ktorý transformuje ultrafialové žiarenie nízkotlakovej ortuťovej výbojky do oblasti viditeľných vlnových dĺžok [11].

## 1.6 Elektroluminiscenčné diódy

Rekombinácia nosičov na PN prechode polovodičovej diody (obrázok 1.9) tvorenej vhodnými materiálmi vyvoláva spontánnu emisiu fotónov, nazýva sa tak elektroluminiscenčná dioda, v skratke LED (z angl. Light Emitting Diode). LED dokážu produkovať žiarenie rôznych materiálmi definovaných spektrálnych oblastí, napríklad rozsah 350 nm až 1300 nm odpovedá šírke zakázaného pásu  $E_g$  intervalu 3,6 eV – 1 eV. Šírku zakázaného pásu definujú konštrukčné materiály PN prechodu s priamou pásovou štruktúrou, kedy sa zachováva hybnosť elektrónu. Charakteristika pásmovej bariéry  $E_g$  medzi vodivým a valenčným energetickým pásmom určuje kvantovú účinnosť a vyžarovanú vlnovú dĺžku  $\lambda$  podľa rovnice [11], [12]:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1.6)$$

kde  $h$  je Planckova konštanta vyjadrujúca základné kvantum fyzikálnych dejov a  $c$  značí rýchlosť svetla. Blízku podobnosť napájacieho napätia LED danej vlnovej dĺžky so šírkou zakázaného pásu jej prechodu spôsobuje vysoká úroveň dotácie prechodov u LED. Záverné napätie býva zhruba 5 V. Luminiscenčné diódy produkujúce kratšie vlnové dĺžky teda na prácu vyžadujú vyššie napätie medzi anódou a katódou [12].



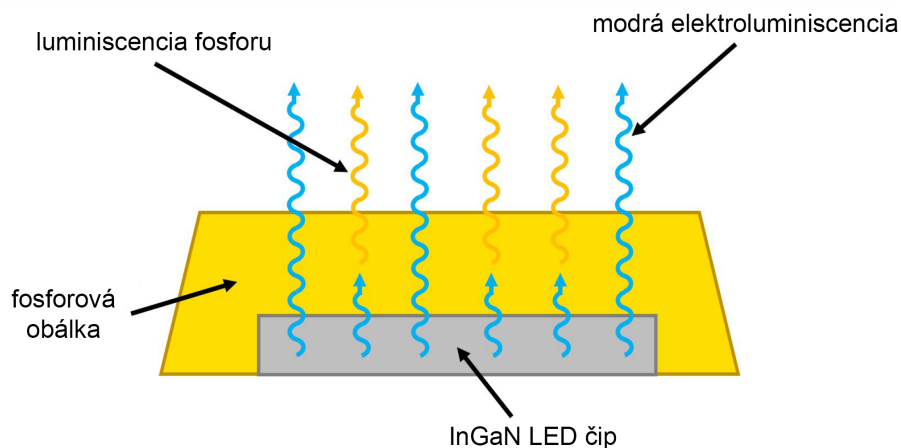
Obr. 1.9: Pásový model LED [13]

### 1.6.1 InGaN LED

Realizáciu vysoko efektívnej modrej luminiscenčnej diódy popísal prvý krát Japonský vedec Shuji Nakamura pracujúci v spoločnosti Nichia a za prácu dostal Nobelovu cenu. Polovodičová štruktúra je tvorená kombináciou india (In) a nitridu gália (GaN) – InGaN. Nitrid gália sám o sebe má šírku zakázaného pásu 3,4 eV, materiálom štruktúrou InGaN je pri odlišných výrobných parametroch možné nastavovaním dosiahnuť rôznych primárne modrých spektrálnych oblastí luminiscencie v intervale ultrafialovej UV-A (365 nm) až zelenej (550 nm) vlnovej dĺžky. Nichia neskôr vďaka úspešne realizovanej modrej LED uviedla na trh prvú luminiscenčnú diódu produkujúcu biele svetlo [13].

### 1.6.2 LED so sekundárnou luminiscenciou

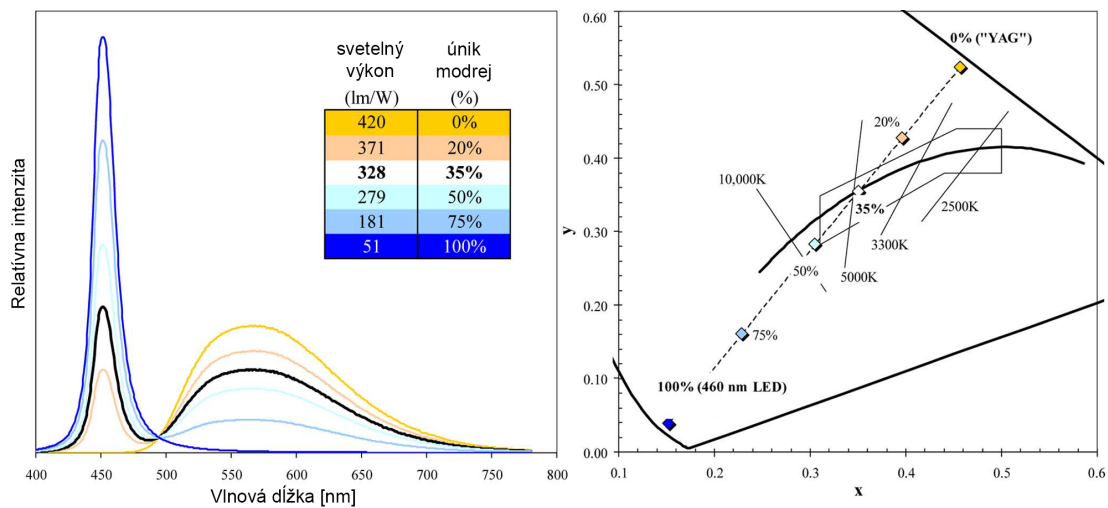
Polovodičová elektroluminiscencia emituje monochromatické žiarenie, tento fyzikálny fakt zamedzuje diódam vyžarovanie spojitiejšieho širšieho spektra z jedného samotného polovodičového čipu diódy. Vlnová dĺžka emitovaných fotónov je úzko orientovaná v okolí spektrálnej oblasti úmernej šírke zakázaného pásu. Pre LED typu InGaN je to obvykle oblasť modrého spektra prekrývajúceho sa s absorpčnou oblasťou určitých fosforov, ktoré dokážu pomocou vlastnej luminiscencie transformovať toto modré žiarenie do spojitiejších oblastí zeleného až červeného spektra. Modrým žiarením excitovaný fosfor má pred návratom do stabilného stavu vnútorné energetické straty, ktoré znížia frekvenciu emitovaného fotónu a posúva tak výsledné vyžarované spektrum [14].



Obr. 1.10: Rez fosforom, proces transformácie žiarenia [13]

Na výrobu bielych polovodičových zdrojov svetla sa využíva najčastejšie konverzný fosfor yttrium aluminium granát (YAG) a jeho ďalšie upravené zloženia či kombinácie iných fosforov. Nie všetky fotóny emitované z InGaN čipu sa podielajú na excitácii fosforu, výsledné spektrum bielej LED je tak závislé na pomere primárnych modrých (430 nm – 460 nm) a sekundárnych fosforom transformovaných fotónov. Tento pomer je možné riadiť sýtosťou, typom a množstvom fosforovej obálky prípadne intenzitou vyžarovania modrej diódy [13].

Na obrázku 1.11 vľavo je znázornená zmena celkového spektra LED v závislosti na množstve úniku monochromatického modrého žiarenia, teda pomeru fosforovej transformácie a náležitú zmenu celkovej svetelnej účinnosti. Pravá strana obrázku 1.11 ukazuje závislosť úniku na výslednej korelovannej farebnej teplote spektra žiarenia. YAG fosfor pumpovaný modrou (460 nm) LED dosahuje v spoločnej kombinácii CCT hodnoty 5000K pri zhruba 35 % úniku modrého žiarenia [14]. S väčším transformačným pomerom stúpa množstvo žiarenia v oblasti kombinovanej zrakovej citlivosti, teda sa zvyšuje svetelný tok a merný výkon diódy vďaka fosforu. Merný výkon fosforových LED tak môže veľmi vzdialene teoreticky indikovať množstvo ich žiarenia v oblasti citlivosti melanopsínu.



Obr. 1.11: Vplyv transformačného pomeru na výsledné spektrum [14]

## 2 Postup riešenia

Význam zámeru snímania externého osvetlenia spočíva v monitorovaní aktuálnej intenzity a chromatickej teploty vonkajšieho osvetlenia a následným odvysielaním dát do zariadenia, ktoré ich vie využiť na napodobenie externých svetelných podmienok. Meranie korelovanej farebnej teploty vonkajšieho osvetlenia je orientačné už len pre obrovské množstvo vplyvov na skreslenie a nesprávnosť výsledku a nevyžaduje tak presné kolorimetrické výsledky. Snímače popísané v tejto kapitole sú svojou presnosťou väčšinou závislé na programovej kalibrácii pri spracúvaní dát.

### 2.1 Porovnanie snímačov osvetlenia

Rakúska spoločnosť Austria Mikro Systeme v skratke ams AG (pôvodne TAOS Inc.), má v ponuke niekoľko iterácií integrovaných obvodov snímačov farby a intenzity osvetlenia. K výrobkom poskytujú dostatočnú dokumentáciu a podporu v podobe aplikačných dokumentov, výber snímača denného osvetlenia sa teda pohybuje primárne v portfóliu produktov firmy ams. Snímače sú delené podľa farebných kanálov podávaných informácií vo formáte RGBC (z angl. Red, Green, Blue, Clear) alebo XYZ koordinátov odpovedajúcim zhruba CIE 1931. V tabuľke 2.1 je uvedené porovnanie zoradené podľa technických parametrov zostupne,  $V_{DD}$  značí rozsah napájacieho napätia a P je spotreba energie v rozsahu režim spánku – maximum.

Tab. 2.1: Porovnanie parametrov uvažovaných snímačov

Výrobca	Snímač	kanál	filter	VDD [V]	P [ $\mu$ A]	interface
ams	AS73211	XYZ 1931	UV/IR	2,7 – 3,6	1 – 2000	I2C
ams	TCS3430	XYZ+IR	UV/IR	1,7 – 2,0	0,7 – 150	I2C
ams	TCS3472	RGBC	UV/IR	2,7 – 3,6	2,5 – 330	I2C
Broadcom	APDS-9250	RGBC	UV/IR	1,7 – 3,6	1 – 130	I2C
ams	TCS3200	RGBC	NIE	2,7 – 5,5	0,1 – 2000	frekvencia

#### AS73211 (XYZ)

Snímače XYZ majú interferenčné filtre fotobuniek riešené takým spôsobom, aby výsledná citlivosť kanálov bola zhodná s CIE 1931 (viz. kapitola 1.3.3) a mohli tak podávať priamo koordináty chromatickosti. AS73211 je presný priemyselný snímač komunikujúci cez zbernicu I2C a je orientovaný výhradne na snímame farby a podávanie XYZ koordinátov, vyznačuje sa vysokou variabilnou citlivosťou a dynamickým

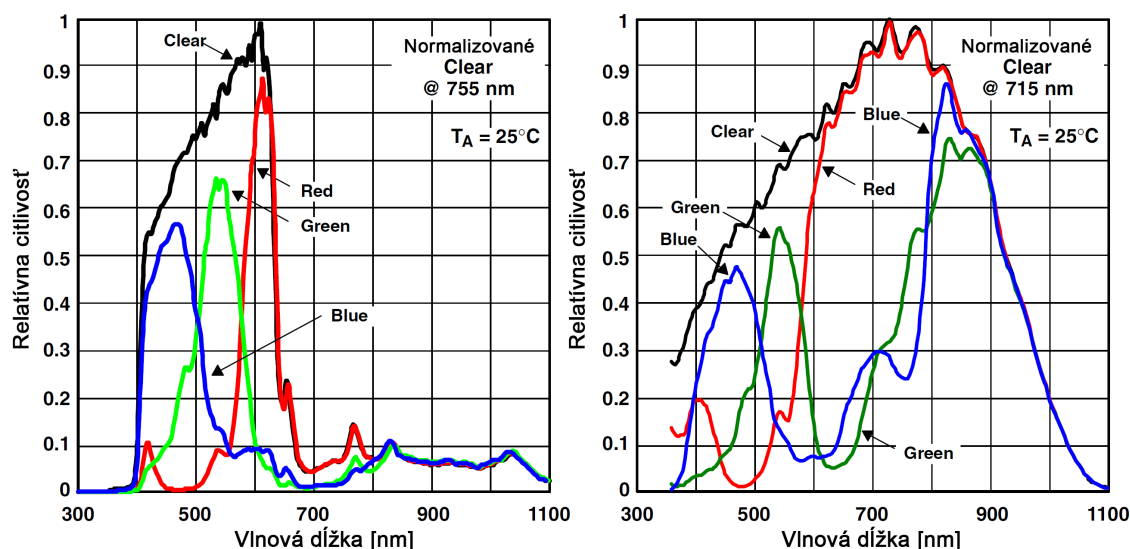
rozsahom až do úrovne 24 bit, navyše poskytuje meranie teploty cez integrovaný snímač napríklad hodnoty ambientu alebo pre teplotnú kompenzáciu presných kolorimetrov. Pre jeho vyššou cenou kompenzovanú nadbytočnú presnosť nie je vhodným riešením [18].

### TCS3430 (XYZ)

TCS3430 sníma farebné zložky do koordinátov XYZ a má dva samostatné nadbytočné infračervené kanály, disponuje zbernicou I2C (1,8 V) a oproti RGB snímačom je primárne zvýhodnený spektrálnou citlivosťou podobnou modelu CIE 1931. [17].

### TCS3472 (RGBC)

Komunikuje prostredníctvom zbernice I2C, verzia čipu TCS34725 má napätie zbernice rovné VDD, model TCS34727 má napätie zbernice max 1,8 V. Tento RGBC snímač sa na rozdiel od TCS3200 nachádza v tabuľkách kalibračných parametrov výrobcu ams AG novšieho aplikačného dokumentu [19]. Snímač má integrovaný UV/IR filter orezávajúci spektrum citlivosti všetkých fotodiód do viditeľnej oblasti ako ostatné uvedené snímače okrem TCS3200 [16].



Obr. 2.1: Porovnanie citlivosti TCS3472 (vľavo) a TCS3200 (vpravo) [15], [16]

### TCS3200 (RGBC)

Integrovaný obvod TCS3200 ako jediný podporujúci 5 V logiku je veľmi dostupný prevodník svetlo – frekvencia schopný podávať zmerané dáta formou hodnoty frekvencie na selektívnom výstupe s možnosťou uplatnenia frekvenčného deliča v troch



úrovních. V mnohých aplikáciách môže byť frekvenčný výstup prebytočná komplikácia a tento zastaralý snímač slúžil len na experimenty pri vývoji riešenia [15].

## **2.2 Konštrukcia snímacieho modulu**

Zariadenie so snímačom je určené jak do interiéru tak primárne exteriéru, doska plošných spojov bola pri návrhu dimenzovaná do krabičky rozmerov 150 x 100 mm so stupňom krytia IP65. Telo krabičky je z ABS plastu s priehľadným polykarbonátovým vrchným dielom dlhodobu odolným proti UV žiareniu. Vďaka optickým vlastnostiam polykarbonátu s priepustnosťou 90 % sa tak približne zachová priepustnosť spektra pre solárny panel aj snímač, zároveň je celé zariadenie mechanicky chránené. Na základe rozmerov vrchného dielu s rezervou pre snímač bol zvolený solárny panel rozmerov 90 x 60 mm so systémovým napätím 6V a dostačujúcim výkonom 0,6 W. Pre dostupnosť a splnenie požadovaných parametrov bol do zariadenia inštalovaný snímač TCS34725.

### **2.2.1 Solárne napájanie snímacieho modulu**

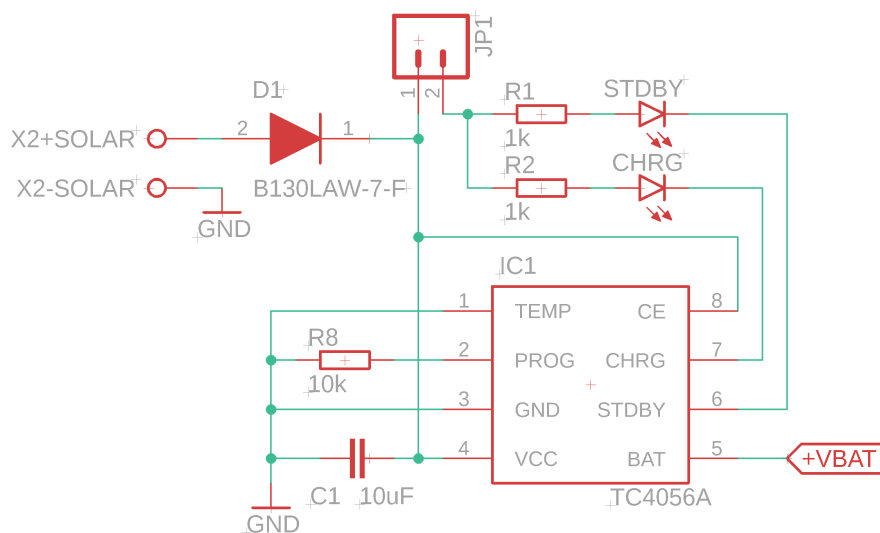
Navrhnuté zariadenie vyžaduje voliteľné napájanie z nízko-výkonového solárneho panelu so systémovým napätím v rozsahu 6 až 7 V, nabíjanie článku lítiového akumulátoru s napätím 3,7 V a následnú reguláciu napätia akumulátoru na 3,3 V. Na ukladanie elektrickej energie zo solárnych článkov do akumulátorov sa obvykle využívajú integrované obvody s meničom napätia využívajúce funkciu sledovania bodu maximálneho výkonu MPPT (z angl. Maximum Power Point Tracking) na zvýšenie efektivity nabíjacieho prúdu do batérie. Nabíjací obvod N3791 [21] výrobcu Consonance Electronic bol zvolený na základe udávaného vstupného napätia z panelu už od hodnoty 4,5 V, prakticky pri poklese a opätovnom nástupe napätia solárneho panelu, na ktoré je obvod nastavený sa nabíjanie občas nespustí, až po dosiahnutí hodnoty vyššej ako predpokladanej je nabíjanie obnovené. Z tejto príčiny bola uprednostnená druhá testovaná varianta s jednoduchším a potenciálne spoľahlivejším konceptom bez spínaného meniča napätia a to s nabíjacím obvodom TC4056A [22] výrobcu Advanced Monolithic Systems (skrata AMS zameniteľná s výrobcom Austria Mikro Systeme).

### **2.2.2 Nabíjací obvod akumulátoru**

Táto aplikácia nevyžaduje vysokú efektívnosť len minimálny prísun elektrickej energie do akumulátora počas dňa schopný kompenzovať spotrebu zariadenia a z dlhodobého hľadiska sa akumulátor nevybíjal. TC4056A funguje na princípe lineárnej stra-

tovej regulácie napätia a nabíjacieho prúdu, teda nevyžaduje žiadne externé prvky okrem odrušovacích kondenzátorov a programovacieho rezistoru, a v tom spočíva zvažovaná spoľahlivosť a bonusová EMC kompatibilita. Nevýhodou je nižšia efektívnosť a tepelné straty pri vyšších hodnotách nabíjacieho prúdu do max 1,2 A. Obvod TC4056A má rozsah vstupného napätia 0,3 - 8 V, a aj napriek tomu, že nie je určený priamo pre solárne napájanie pracuje v takom zapojení spoľahlivo, a už od absolútne minimálneho výkonu z panelu poskytuje nabíjacie prúdy v hodnotách mikroampérov. Akumulátor je tak nabíjaný aj za nepriaznivých svetelných podmienok.

Popisované zapojenie obvodu sa nachádza na obrázku 2.2. Vstupná Shottkyho usmerňovacia dióda B130LAW výrobcu Diodes Incorporated má nízky úbytok napätia 0,25 V ( $I = 100 \text{ mA}$ ) až 0,38 V ( $I = 1 \text{ A}$ ) čím minimalizuje energetické straty z panelu a zároveň chráni proti prepólovaniu alebo toku prúdu do solárnych článkov. Solárne napájanie je cez diódu vedené priamo na vstup TC4056A s odrušovacím kondenzátorom C1 a cez spojku JP1 je možné tiež pripojiť kontrolku stavu nabitia STDBY, ktorá sa pri nedostatočnom vstupnom napätí nerozsvieti vôbec a kontrolku nabíjania akumulátora CHRG svetlivosťou priamo indikujúcu úroveň napätia panelu, odstránením spojky sa kontrolky odpoja pre zníženie spotreby v prevádzke. Pomocou kontroliek po odpojení akumulátora je tak možné nájsť minimálne potrebné svetelné podmienky na prácu obvodu, CHRG bliká a STDBY konštantne svieti. Rezistory pre LED kontrolky sú v hodnote 1 k, pre zelené diódy sa odporúča vyššia hodnota. Programovacím rezistorom R8 sa nastavuje maximálny nabíjací prúd, pre túto aplikáciu stačí 100 mA a podľa katalógového listu potom hodnota R8 bude 10 k $\Omega$ . Vývod pre snímanie teploty článku je nepotrebný a uzemnený.

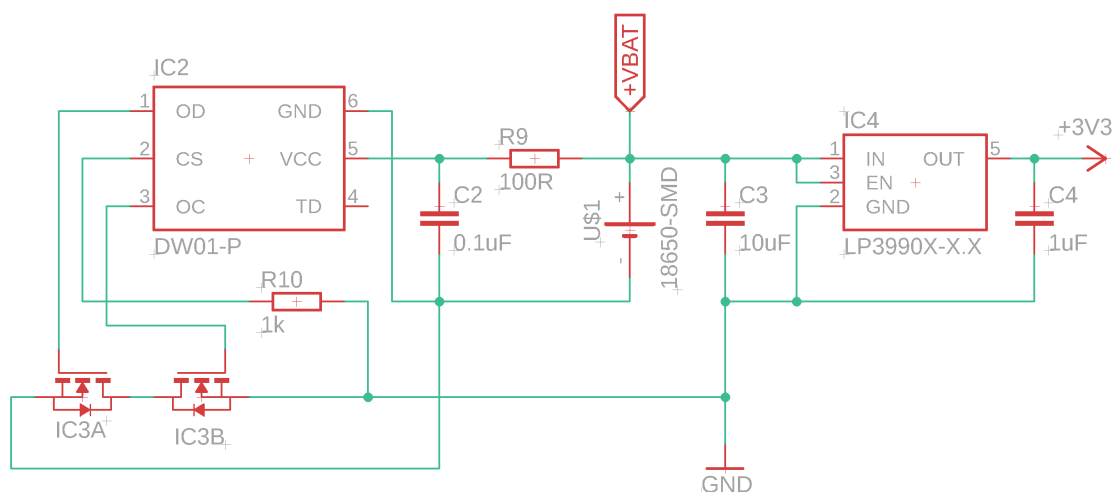


Obr. 2.2: Schéma zapojenia TC4056A

Nabíjací obvod TC4056A je skombinovaný so štandardným zapojením (obrázok 2.3) ochrany akumulátoru pomocou obvodu DW01A výrobcu Fortune Semiconductor, využívajúci dvojicu spínacích N-kanálových MOSFET tranzistorov (obvod FS8205A alebo ekvivalentný), ktoré anódu článku odpoja od spoju uzemnenia v prípade skratu alebo podvybitia, takáto ochrana je základ v každom obvode s lítiovým akumulátorom na obmedzenie rizika vzniku požiaru a tiež poškodenia akumuláčnej schopnosti podvybitím.

### 2.2.3 Napájanie snímacieho obvodu s XBee 3

Reguláciu napätia na finálnu úroveň 3,3 V vykonáva lineárny regulátor LP3990MF-3.3 výrobcu Texas Instruments so vstupným napätím do 6,5 V a úbytkom napätia len 120 mV pri výstupnom prúde 150 mA, použiteľný pre napájanie napätovej úrovne 3,3 V z 3,7 V lítiového článku, limit regulátoru LP3990MF-3.3 tak dosahuje až pri úplnom vybití.



Obr. 2.3: Schéma zapojenia ochrany akumulátoru DW01A a regulátoru LP3990MF-3.3

## 2.3 Konštrukcia svietidla

Modul svietidla je realizovaný na dvojvrstvej DPS rozmerov 150 x 150 x 1,5 mm materiálu FR-4 s riadiacimi prvkami na vrchnej strane, maticou LED na strane spodnej a montážnymi otvormi priemeru 3 mm v každom rohu. Takouto netradičnou formou je demonštrovaný spôsob vyššej integrácie obvodových prvkov pri konštrukcii osvetlovacích telies vďaka novým a efektívnym technológiám luminiscenčných diód s vysokou účinnosťou prevodu elektrickej energie na žiarenie.

### Zhrnutie požadovaných vlastností biodynamického svietidla

- Široký rozsah CTT, 2700 - 6500 K (ideálne 1800 - 6500 K),
- kombinácia vhodne sa dopĺňujúcich fosforov LED (kanálov),
- minimálny únik modrej zložky pre nízke hodnoty CCT,
- dostatočný rozsah intenzity na ambientné aj pracovné osvetlenie,
- hodnota CRI nad 80 ideálne okolo 90,
- plynulý prechod teploty bielej,
- rovnomerná regulácia svetelného toku.

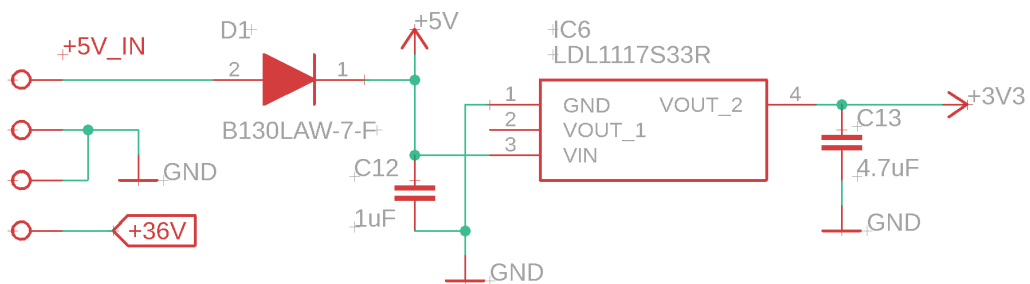
### 2.3.1 Výber luminiscenčných diód

Veľký dôraz bol kladený na kvalitu samotných luminiscenčných diód, nakoľko majú hlavný vplyv na charakter produkovaného svetla. Pri výbere LED po určení vhodného púzdra, v tomto prípade 2835, je nutné si zvoliť preferenciu, a to buď v cene, indexe podania farieb, alebo účinnosti. S hodnotou CRI obvykle stúpa cena a klesá účinnosť pretože konverzný fosfor je kvalitatívne orientovaný na plnosť spektra a nie na svetelný výkon, tým pádom je zložitejší na výrobu. Zvažované boli napríklad LED od výrobcov Lumileds rady LUXEON 2835 s CRI > 95 (150 lm/W), BRIDGELUX rady Thrive s CRI > 95 (120 lm/W) a Samsung rady LM281B+ RA90 s CRI > 90 (165 lm/W). Všetky varianty splňujú vysoké štandardy spektrálnej kvality, parametrami podania farieb však vedie rada Thrive od BRIDGELUX. Vďaka dostupnosti a vynikajúcej účinnosti boli finálne osadzované LED Samsung LM281B+ v rozsahu CCT 2700 - 6500 K. Svietidlo má teoretický príkon 30 W z toho teplý a studený kanál má 15 a 15 W.

### 2.3.2 Napájanie obvodu

Jednosmerné napájanie LED regulátoru je dimenzované na 36 V a riadiaci obvod má samostatný vstup na 5 V lineárne regulovaný na úroveň 3,3 V pomocou integrovaného obvodu LDL1117S33R výrobcu STMicroelectronics podľa zapojenia na obrázku 2.4. Za Schottkyho diódou 5 V konektoru je priamo pripojený modul detektoru

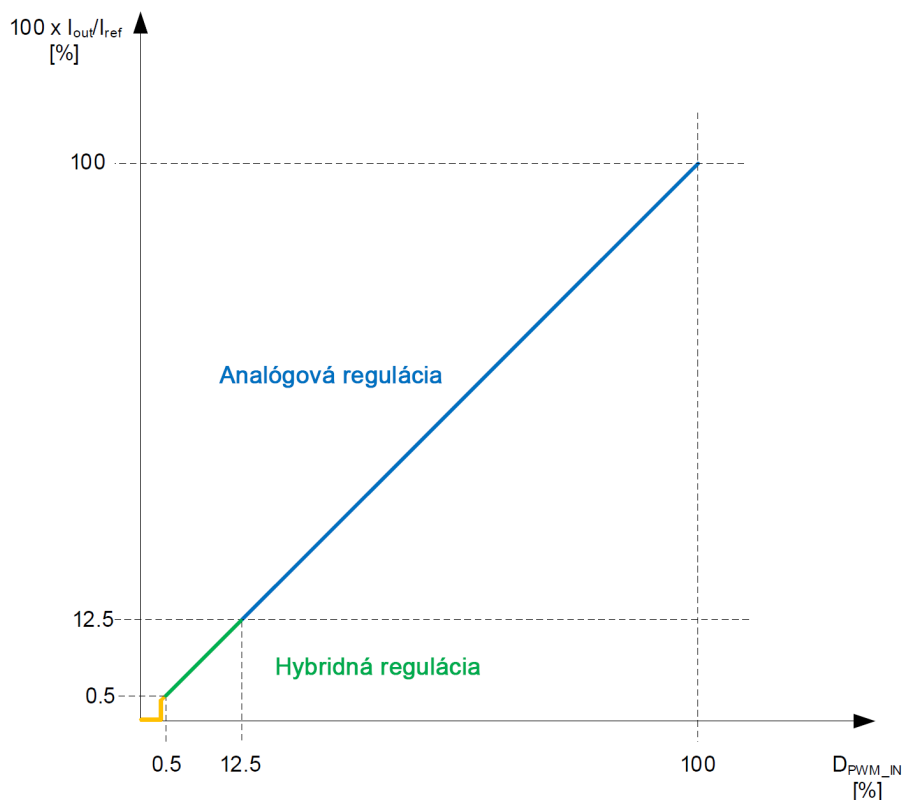
prítomnosti osôb RCWL-9196 optimálne pracujúci na napätí od 4 V. Výkonová časť môže byť teoreticky napájaná aj vyššími alebo mierne nižšími hodnotami ako 36 V, predpokladá sa však mierna zmena účinnosti a frekvencie spínania regulátoru. Riešenie napájania riadiacej časti obvodu tak bolo výhodnejšie osamostatniť, zároveň je v prípade potreby možné zdroj výkonovej časti úplne odpojiť od siete vždy pri vypnutí svietidla pomocou spínača alebo relé, na ktorého spínanie bol vytvorený 3,3 V logický výstup z dosky.



Obr. 2.4: Schéma zapojenia konektoru a regulátoru riadiacej časti LDL1117

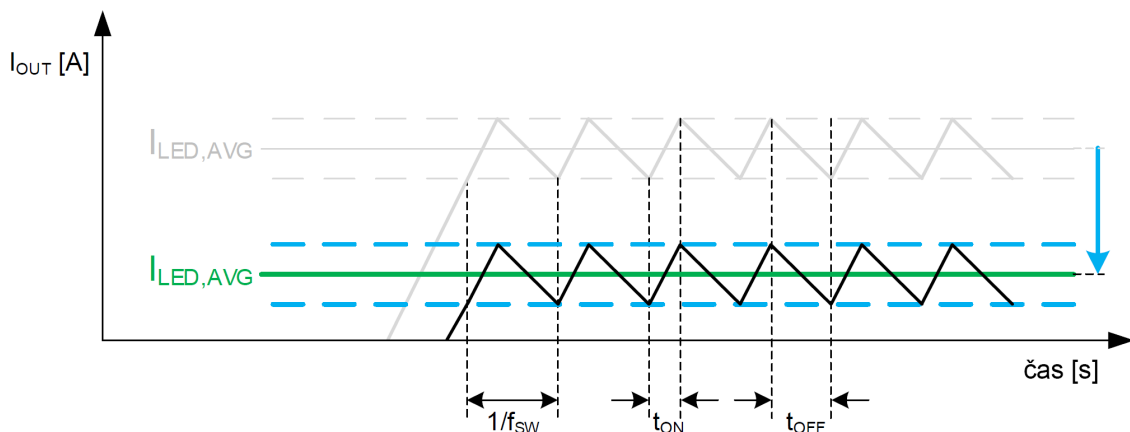
### 2.3.3 Regulovateľný zdroj prúdu LED s ILD8150

Najprirodzenejší spôsob tlmenia jasú svetla je postupný, neprerušovaný a bez zložiek blikania či iného rušenia. Na výber z integrovaných obvodov určených na reguláciu prúdu špeciálne pre LED aplikácie je veľké množstvo od mnohých výrobcov, bežným obmedzením prúdovej regulácie jasú luminiscenčných diód je deformácia spektrálneho výstupu pri veľmi nízkych hodnotách, ktorých potom nie je možné dosiahnuť. Pre túto prácu bol preto zvolený integrovaný obvod ILD8150 výrobcu Infineon so schopnosťou hybridne kombinovať (obrázok 2.5) technológiu regulácie konštantného prúdu CCR (z angl. Constant Current Regulation) s pulzne-šírkovou moduláciou PWM (z angl. Pulse Width Modulation) vďaka čomu má teoretický regulačný rozsah prúdu 0,5 - 100 % pri zachovaní výstupného spektra svietidla. Popis funkcie obvodu a vzťahy pre výpočty parametrov sa orientujú podľa dokumentácie od výrobcu [26].



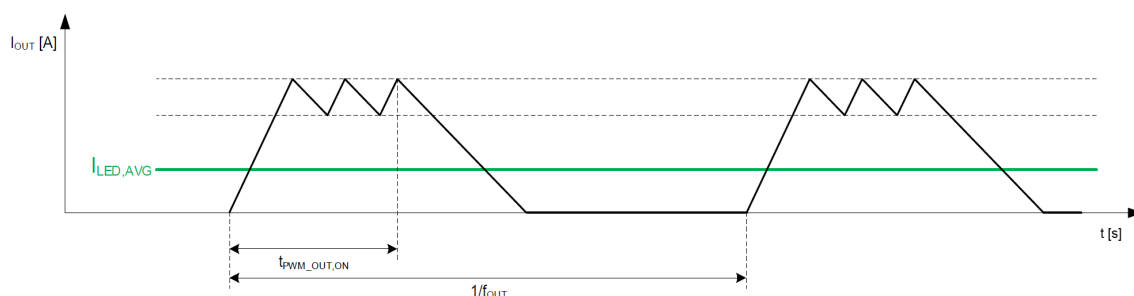
Obr. 2.5: Hybridná kombinácia a plynulý prechod regulácie CCR a PWM [26]

Regulácia prúdu obvodom ILD8150 je realizovaná znižujúcim spínaným meničom, ktorý pomocou komparátoru s hystereziou porovnáva úbytok napätia na meracom rezistore  $R_{CS}$ . Pokles pod spodnú hranicu hysterézie spína vstup induktoru až kým nárast hodnoty prúdu záťažou nespôsobí zvýšenie úbytku napätia  $R_{CS}$  nad hornú hranicu kedy sa napájanie induktoru odpojí. Hodnota  $I_{LED,AVG}$  je teda stredná hodnota prúdu v čase, ktorá sa podľa interne nastavenej komparačnej hodnoty následne mení ako znázorňuje obrázok 2.6. Hodnotu prúdu záťažou obvod takto nastavuje na základne vstupnej striedy PWM signálu vo frekvenčnom rozsahu 250 Hz - 20 kHz.



Obr. 2.6: Hysteréza spínania a analógová regulácia prúdu záťaže [26]

Regulácia prúdu dosahuje minimum na 12,5 % maximálnej hodnoty  $I_{LED,AVG}$ , ILED8150 potom prechádza do hybridného režimu (obrázok 2.7), kedy je minimálna hodnota regulovaného prúdu modulovaná frekvenciou 3,4 kHz v súlade s normou IEEE1789-2015 pre elimináciu efektu blikania. Výsledná stredná hodnota modulovaného prúdu potom klesá až do 0,5 % maxima prúdu  $I_{LED,AVG}$ .



Obr. 2.7: Hysteréza spínania a analógová regulácia prúdu záťaže [26]

## Výpočet parametrov regulátorov

Pre sériové zapojenie 10 LED s úbytkom napätia 3,1 V a maximálnym pracovným prúdom 150 mA v troch paralelných vetvách je potom celkové napätie takého zapojenia:

$$V_{LED} = 10 \cdot 3,1V = 31V \quad (2.1)$$

A maximálny prúd sa spočíta podľa počtu paralelných sérií:

$$I_{LED,AVG} = 3 \cdot 0,150 = 0,45A \quad (2.2)$$

Vstupné napätie regulátoru bude teda  $V_{IN} = 36$  V, maximálne výstupné napätie  $V_{OUT} = 31$  V a maximálny výstupný prúd  $I_{LED,AVG} = 450$  mA na kanál, teda na jeden regulátor. Úbytok napätia  $R_{CS}$  sa vypočíta podľa strednej hodnoty hysterézie:

$$V_{CS} = \frac{V_{CSH} + V_{CSL}}{2} = 360mV \quad (2.3)$$

Kde  $V_{CSH}$  je horná hranica a  $V_{CSL}$  spodná. Hodnota  $R_{CS}$  pre prúd  $I = 450$  mA s úbytkom napätia 360 mV bude:

$$R_{CS} = \frac{V_{CSH}}{I_{LED,AVG}} = \frac{0,36V}{0,45A} = 0,8\Omega \quad (2.4)$$

Výpočet stratového výkonu rezistoru  $R_{CS}$ :

$$P_{dis} = R_{CS} \cdot I_{LED,AVG}^2 = 0,8 \cdot 0,45^2 = 0,16W \quad (2.5)$$

Merací rezistor  $R_{CS}$  tak bude s výkonovou rezervou v púzde SMD 2512. Potrebný je tiež výpočet zvlnenia výstupného prúdu:

$$\Delta I_{OUT} = \frac{V_{CSH} - V_{CSL}}{R_{CS}} = 38mA \quad (2.6)$$

S ohľadom na efektivitu, EMC a odporúčanie výrobcu sa určila frekvencia spínania  $f_{sw}$  na hodnotu 100 kHz, na základe čoho sa potom spočíta hodnota induktoru:

$$\begin{aligned} L &= \frac{R_{CS} \cdot (V_{OUT} - V_{IN} \cdot t_{delay} \cdot f_{sw})}{f_{sw} \cdot (V_{CSH} - V_{CSL})} \\ &- \frac{R_{CS} \cdot V_{OUT}^2}{V_{IN} \cdot f_{sw} \cdot (V_{CSH} - V_{CSL})} \\ &= \frac{0,8 \cdot (31 - 36 \cdot (120 \cdot 170) \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3)}{100 \cdot 10^3 \cdot (0,39 - 0,33)} \\ &- \frac{0,8 \cdot 31^2}{36 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot (0,39 - 0,33)} \\ &= 387\mu H \approx 390\mu H \end{aligned} \quad (2.7)$$

Kde  $t_{delay}$  je interné oneskorenie (120 ns) a  $t_{fltr}$  oneskorenie RC filtru (270 ns) dimenzovaného na 600 kHz pre obmedzenie rušenia vyšších frekvencií podľa výrobcu,  $R = 1,5$  k $\Omega$  a  $C = 180$  pF. Induktor má hodnotu 390  $\mu$ H a saturačný prúd väčší ako vrcholová hodnota prúdu  $I_{Pk}$ :



$$I_{Pk} = I_{LED,AVG} + \frac{\Delta I_{OUT}}{2} = 488mA \quad (2.8)$$

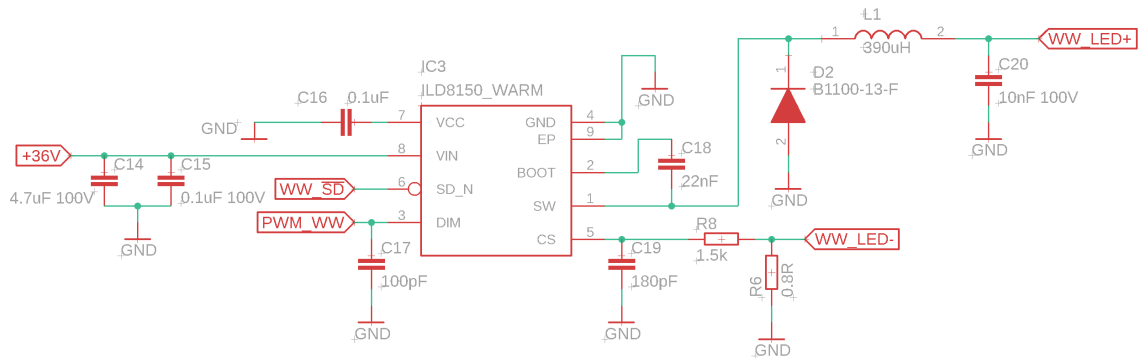
Induktor osadzovaný na dosku má maximálny pracovný prúd 1,1 A. Hodnota kondenzátoru  $C_{boot}$  pre driver interného spínacieho MOSFET tranzistoru je podľa výrobcu 22 nF. Na výpočet prúdu diódou induktoru je nutné zistiť striedu  $D$ :

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{31}{36} = 0,8611 - D = 0,139 \quad (2.9)$$

Efektívna hodnota prúdu diody  $I_{D,RMS}$  bude:

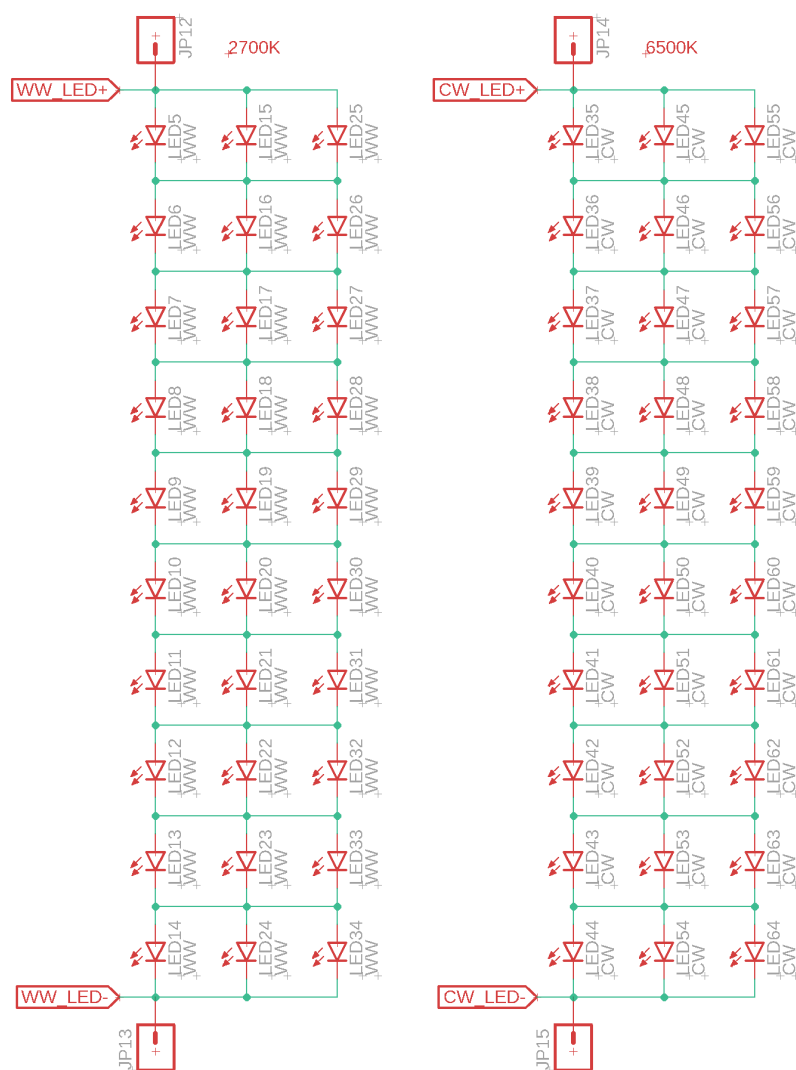
$$\begin{aligned} I_{D,RMS} &= I_{LED,AVG} \cdot \sqrt{1-D} \sqrt{1 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{\Delta I_{OUT}}{I_{LED,AVG}}\right)^2} \\ &= 0,45 \cdot \sqrt{0,139} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{0,038}{0,45}\right)^2} \\ &= 168mA \end{aligned} \quad (2.10)$$

Ak je prúd diódou pod 1 A, výrobca odporúča použiť súčiastku s pracovným prúdom 1 A. Vybraná usmerňovacia Shottkyho dióda induktoru B1100-13-F výrobcu Diodes Inc. má parametre maximálneho prúdu 1 A a záverné napätie 100 V. Za výstup induktoru sa umiestni odrušovací kondenzátor hodnoty 10 nF pre zlepšenie EMC kompatibility. Výsledné zapojenie obvodu regulátoru teplého kanálu je na obrázku 2.8, zapojenie regulátoru studeného kanálu je identické. Pri výbere komponentov obvodovej časti regulátoru je nevyhnutné aby boli dimenzované nad hodnotu vstupného napätia s rezervou, ideálne s maximálnym pracovným napätím 100 V.



Obr. 2.8: Schéma zapojenia znižujúceho regulátoru prúdu ILD8150 pre teplú bielu

Na schému regulátoru nadväzuje zapojenie LED kanálov na obrázku 2.9 sériovo-paralelnou metódou, ktorá rovnomerne rozloží prúdy pri nehomogenite úbytkov napätia a v prípade poruchy jednej diódy umožní zvyšku obvodu pokračovať v činnosti.

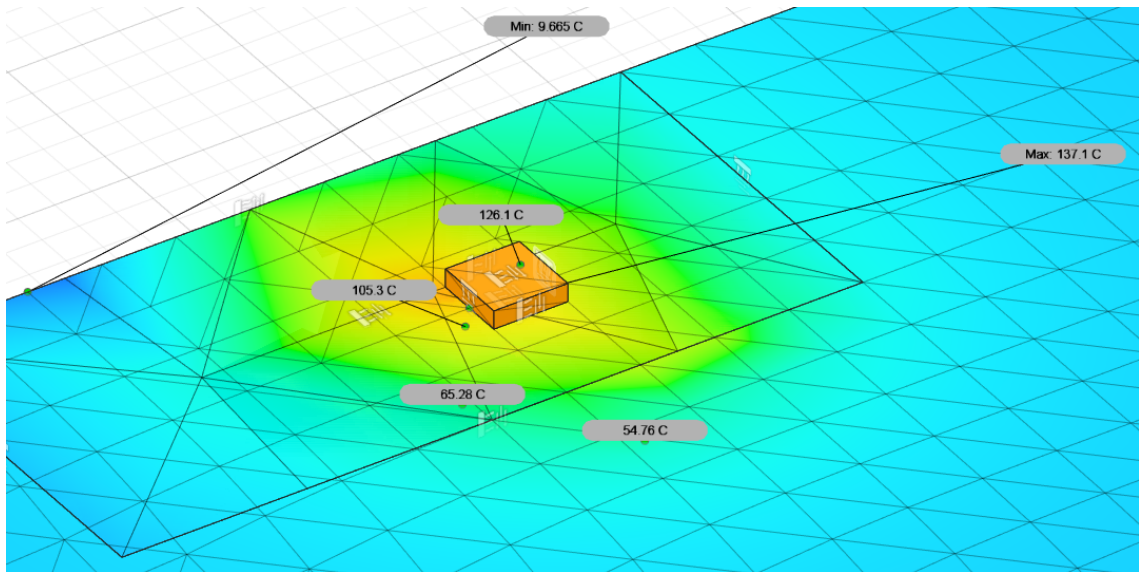


Obr. 2.9: Schéma sériovo-paralelného zapojenia LED kanálov

### 2.3.4 Teplotný management

Pri návrhu obvodu a DPS výkonových prvkov je dôležitým faktorom chladenie, potreba zabezpečiť odvod tepla od súčiastok na zamedzenie vzniku oblastí s nadmernou teplotou pri prevádzke, minimálne neprekročiť bezpečné limity a nedošlo tak k zníženiu spoľahlivosti komponentov a spojov. V programe Autodesk Fusion 360 bola vykonaná teplotná simulácia, avšak s nesprávnymi výsledkami, teploty dosahovali vyšších hodnôt než sa predpokladalo, až do 200 °C. Jeden z výsledkov priniesol poznatok, že štandardná teplotná simulácia v danom programe nepodporuje pridávanie

tenkých, napríklad 35 mikrónových vrstiev simulujúcich medennú vrstvu spojov na epoxidovej doske. Program o tejto skutočnosti sám informuje varovaním, že pri veľmi tenkých objektoch sa priestorová sieť aproximačných sekcií simulácie možno nespočíta správne. Na obrázku 2.10 je vidieť hodnota napríklad 9,7 °C, čo je prakticky nereálne. Fusion 360 obsahuje v databáze materiálov FR-4 a materiál predstavujúci plastové púzdra komponentov, pre simuláciu LED bol vytvorený objekt s materiálovou definíciou plastového púzdra alebo medi, s tepelným (stratovým) výkonom telesa 0,5 W.



Obr. 2.10: Teplotná simulácia vo Fusion 360 s vrstvou medi

### 2.3.5 Riadiaci obvod svietidla

Svietidlo riadi 32-bitový ARM mikrokontrolér STM32F103C8T6 rady F [23] kompatibilný s pôvodne vybraným novším modelom STM32L151CBT6A rady L, ktorý bol pri objednávke komponentov na realizáciu nedostupný, obe varianty s jadrom Cortex-M3. Rada F má navyše štandardný vstup VBAT záložnej batérie napríklad pre obvod reálneho času RTC (z angl. Real Time Clock) v prípade výpadku napájania, obvod bol doplnený o slot štandardnej záložnej lítiovej batérie typu CR2032. K mikrokontroléru je na DPS pripojený externý oscilátor systémového hodinového signálu a oscilátor reálneho času. Výpočetné potreby svietidla samozrejme splní mikrokontrolér kategórie ARM Cortex-M0+, softvér bol vyvíjaný odpočiatku na jadre Cortex-M3 a k tomu ani minimálny cenový rozdiel nedával dôvod na zmenu, zároveň aby nedošlo k prípadnej nekompatibilitate periférií. Ovládanie svietidla v manuálnom režime je riešené cez infračervený prijímač pripojený k mikrokontroléru, ktorý následne dekoduje signál a vykoná príslušné operácie.

### 2.3.6 Detektor prítomnosti

K mikrokontroléru je cez jednoduchý konektorový slot pripojený radarový modul detektoru prítomnosti človeka založený na princípe Dopplerovho javu, integrovaný obvod RCWL-9196 má vlastné obvodovými prvkami nastaviteľné detekčné hranice analógového signálu z radaru. Po prekročení hranice vyšle krátky signál HIGH logickej úrovne 3,3 V, v klude je výstup obvodu LOW. Modul detektoru je napájaný 5 V, má vlastný regulátor napätia a tak je kompatibilný s 3,3 V logikou. Obvod bol testovaný aj pri napájaní napätím 3,3 V a detekcia funguje správne, výrobca však odporúča minimálne 4 V a nedá sa tak zaručiť spoľahlivosť, ktorá samozrejme v tejto aplikácii nie je kritická. Predpokladá sa tiež, že užívateľ detektor nevyžaduje, spojkou označenou na DPS je možné jednoducho signál z detektoru softvérovo vyradiť a detektor kompletne fyzicky odpojiť z konektoru.

### 2.3.7 Komunikačný modul svietidla

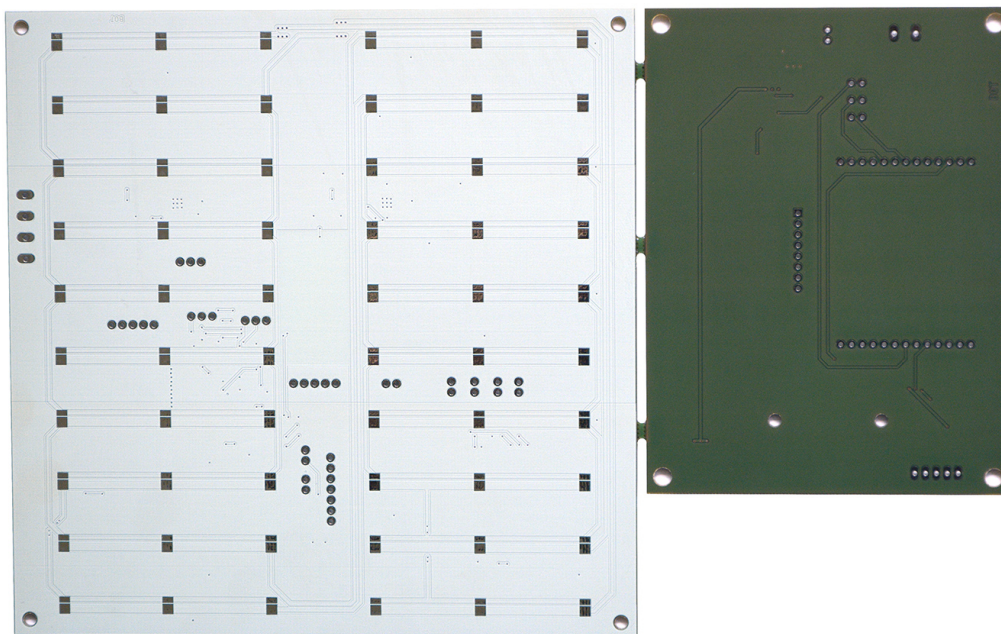
Osadený komunikačný modul svietidla je XBee 3 výrobcu DIGI model XB3-24Z8US-J s vývodom na 2,4 GHz anténu podporujúci najnovší protokol Zigbee 3.0, bližšie parametre sú popísané v dokumentácii [24]. Je riešený na spôsob systému na čipe v skratke SoC (z angl. System on Chip), kombinujúci mikrokontrolér a rádiový obvod v jednom integrovanom obvode na miniatúrnej doske plošných spojov formátu mikro (MMT). Jadrom rádiových komunikačných modulov DIGI rady Xbee 3 je SoC EFR32MG výrobcu Silicon Labs (SiLabs) s jadrom ARM Cortex-M4 pracujúcim na frekvencii 32 MHz. Systém EFR32 je určený práve pre komunikačné moduly rady Gecko výkonovo a parametrovo tým pádom pravdepodobne zhodné s modulmi XBee 3, navyše sú moduly Gecko programovateľné v jazyku C pomocou vývojového prostredia Simplicity Studio tiež od SiLabs založeného na platforme Eclipse, narozdiel od MicroPython prostredia modulov XBee. Programovať iným spôsobom moduly XBee výrobca nikde neodporúča a preto to nebolo ani testované.

Z toho plynie skutočnosť, že samotné komunikačné moduly obsahujú výkonné jadro integrovaného mikrokontroléru v SoC, ktorý popri riešení komunikačnej časti rádiového obvodu má veľkú výpočetnú a pamäťovú kapacitu na vykonávanie ďalších funkcií. Obmedzením komunikačných SoC je však častokrát nedostatočný počet vývodov a zberníc. V mnohých aplikáciách typu zmerať, spracovať a odoslať dáta potom stráca zmysel kombinovať takto výkonný mikrokontrolér so slabším alebo jednoduchým 8-bitovým mikrokontrolérom vykonávajúcim požadovanú činnosť. Týmto sa riadil návrh snímacieho obvodu a preto neobsahuje žiadny ďalší mikrokontrolér, komunikačný modul XBee 3 je plne schopný obsluhovať použitý snímač. Teoreticky SoC EFR32 plne postačuje na riešenie riadenia celého modulu svietidla. Plugin výrobcu DIGI vo vývojovom prostredí PyCharm určený pre vývoj softvéru v jazyku

MicroPython pre moduly XBee nie je úplne vhodný pre programovú prácu na nízkej úrovni, preferencia tak rozhodne spadá napríklad na SoC v podaní Gecko s vhodnejším vývojovým prostredím a programovacím jazykom alebo použitie ako v tomto prípade samostatného mikrokontroléru.

### 3 Realizácia

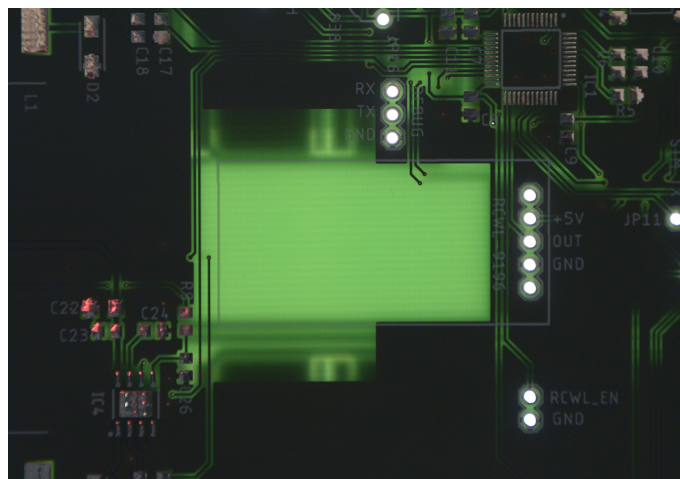
Návrh DPS spodnej strany spojov prototypu svietidla na obrázku 3.1 bol vytvorený s ohľadom na symetrické a rovnomerné rozloženie LED s dostatočnou vzájomnou vzdialenosťou s pozdĺžnym striedaním kanálov. Široké spoje napomáhajú odvodu tepla, a preto sú predimenzované všade kde je voľný priestor. Väčšina pasívnych súčiastok oboch zariadení je v púzdre 0805 splňujúcom potrebné hodnoty parametrov, to napomáha menšiemu počtu položiek objednávok a výhodou je aj jednoduchšie osadzovanie zvlášť ak DPS poskytuje dostatok priestoru. Výrobný proces, v ktorom bol prototyp vyrobený neumožňuje aplikáciu bielej masky, problém bol vyriešený netradičným pokrytím celej spodnej vrstvy servisnou potlačou, teda bielou farbou. Výsledok bol uspokojivý, avšak nevyrovná sa kvalite bielej masky. Strana súčiastok je rozložená rovnomerne vzhľadom na dostatok miesta a minimálne výkonové prvky umiestňované tak, aby sa vyhýbali luminiscenčným diódam zo strany spodnej resp. miestam generujúcim teplo.



Obr. 3.1: Hotový panel dosiek plošných spojov, spodná strana

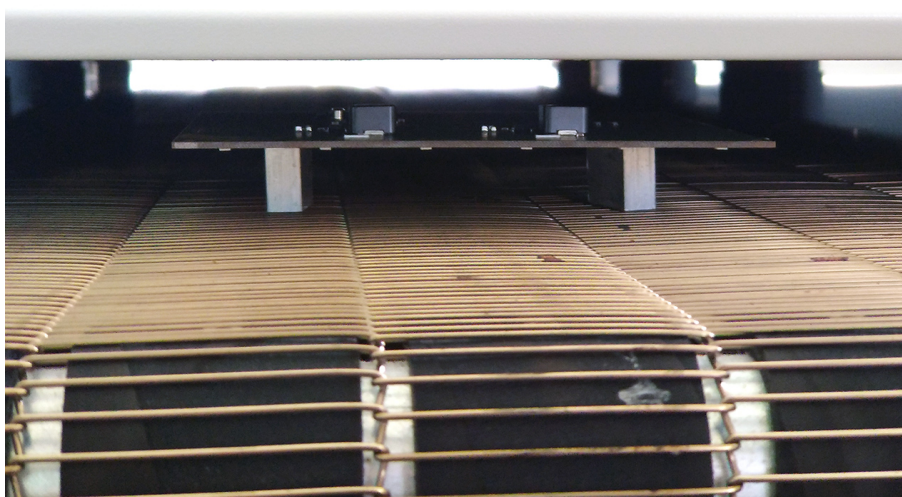
Pre minimalizáciu odrazov mikrovlnného vysielania detektoru prítomnosti bol vytvorený výrez v medi približne rozmerov modulu z oboch strán viditeľný na obrázku 3.2, predpokladal sa negatívny dopad na odvod tepla LED v okolí výrezu znateľný na snímkoch 3.6 a 3.7 z termokamery.





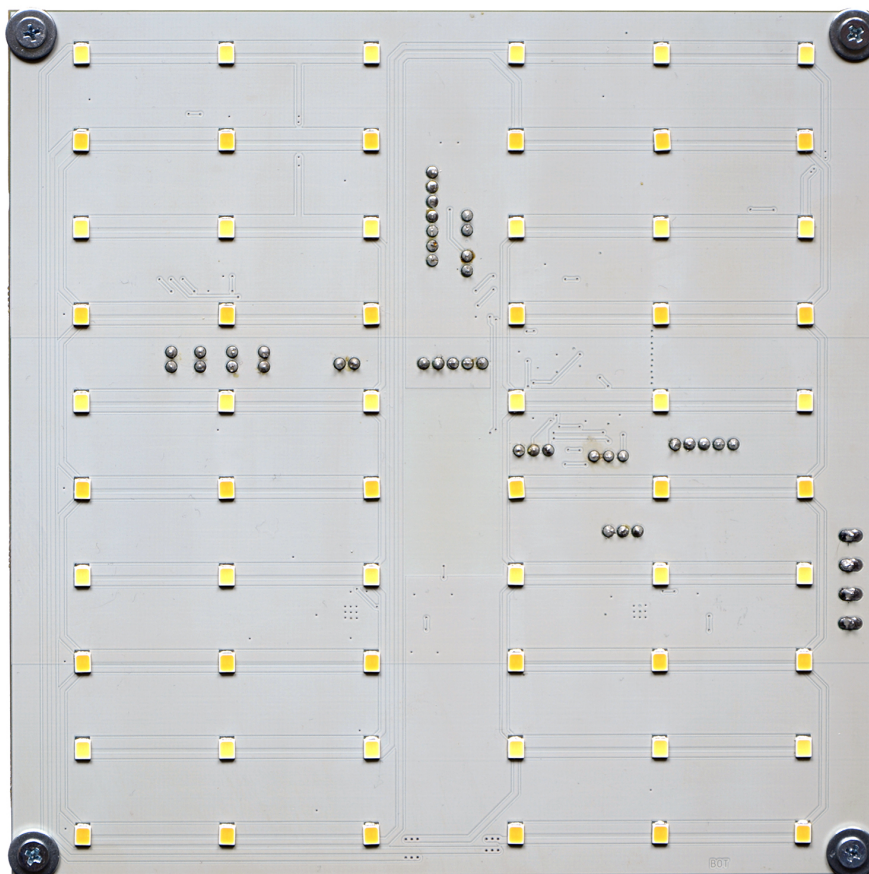
Obr. 3.2: Výrez v medi pre mikrovlnný detektor prítomnosti

Pri osadzovaní dvojvrstvej DPS sa súčiastky v sériovej výrobe upevňujú samostatným procesom aplikácie lepidla, zároveň plošné spoje obsahujúce LED sa väčšinou osadzujú len jednostranne. Dopredu sa predpokladalo, že súčiastky pri otočení DPS a opätovnom pretavení nespadnú vďaka poznatkom o pretavovaní spojov púzdra 2835 získaných po odbornej konzultácii. Proces osadzovania a pretavenia LED v peci bol vykonaný ako prvý, následne boli osadené súčiastky vrchnej strany a s vhodným vypodložením spodnej strany s LED na dopravníku sa DPS vložila do pretavovacej pece.



Obr. 3.3: Pretavenie vrchnej strany súčiastok DPS s osadenými LED

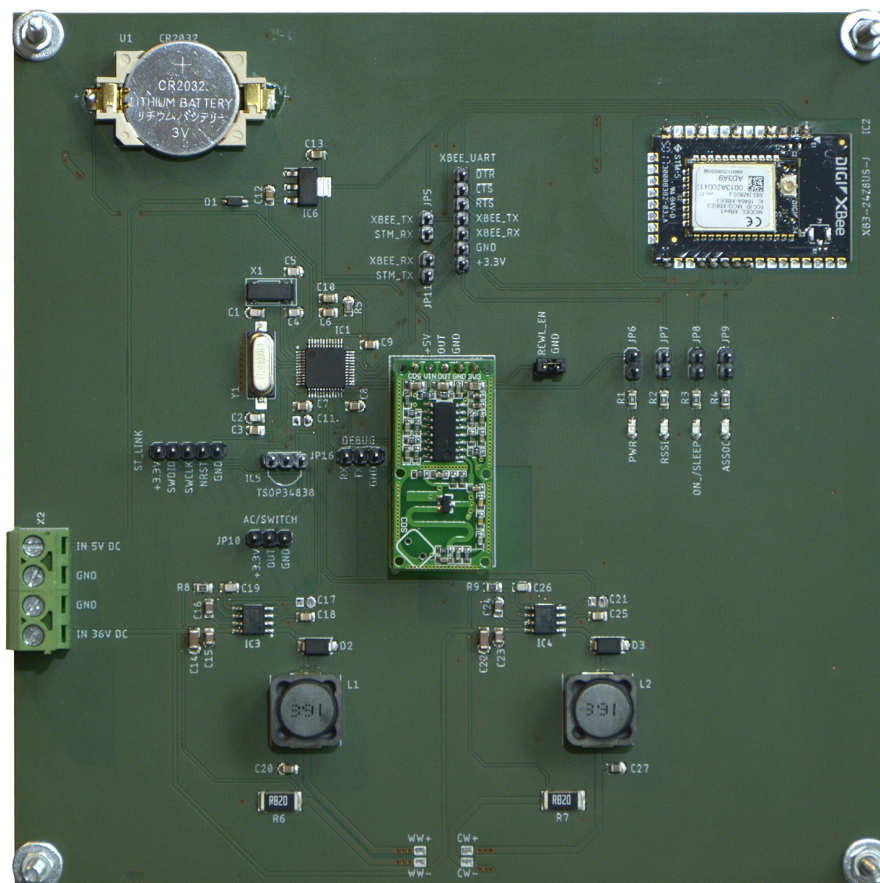
Na obrázku 3.4 je vyfotografovaný hotový prototyp svietidla zo strany LED a z vrchu na obrázku 3.5. Pri bližšom pozorovaní sú znateľné mierne stopy znečistenia a farebných chemických stôp na bielej vrstve potlače, ktoré sa začali tvoriť po pretavení, technickej manipulácii a čistení. To prináša poznatok o nevhodnosti servisnej potlače pre účely vytvorenia opticky bielych plôch na DPS z dôvodu nízkej odolnosti proti degradácii povrchu vplyvom pôsobenia chemických látok a nečistôt. Stopy nebolo možné dokonale odstrániť, prakticky však nemajú vplyv na funkčnosť prototypu.



Obr. 3.4: Spodná strana DPS s LED

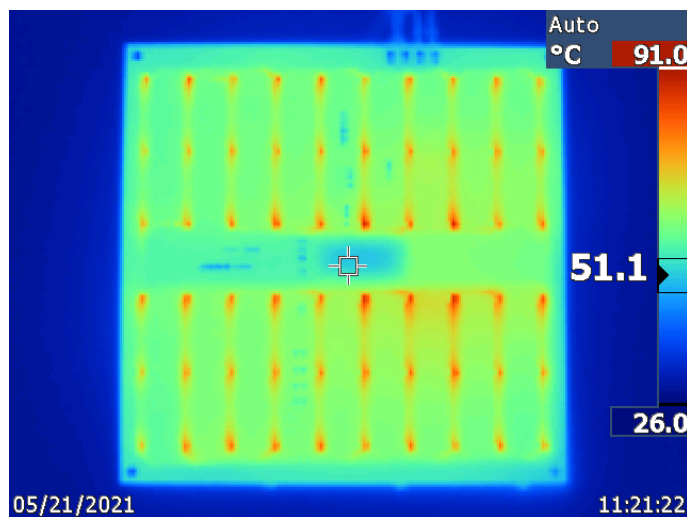
Vrchná strana DPS na obrázku 3.5 obsahuje konektorové vývody s rozstupom 2,54 mm pre programátor ST LINK, debug UART, UART modulu XBee 3, spojky prepojujúce UART medzi Xbee a mikrokontrolérom, konektorový port pre detektor prítomnosti, spojku pre softvérové vypnutie detektoru a konektor pre prípadný spínač sieťového napájania zdroju. Infračervený prijímač je osaditeľný metódou THT na stranu LED, pri testovaní bol pripojený na konektor z vrchnej strany.



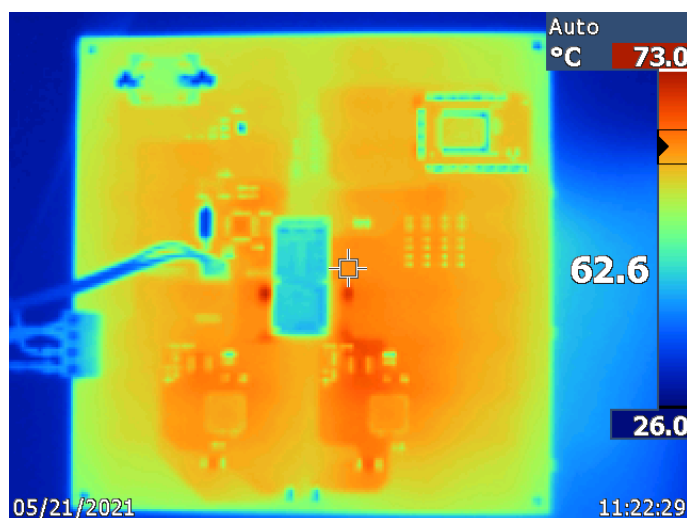


Obr. 3.5: Vrchná strana DPS so súčiastkami

Mapovanie teploty prebiehalo pri maximálnom výkone, po ustálení dosahovala teplota telesa svietidla priemerne 55 °C, púzdra LED okolo 80 °C a maximum sa nachádzalo na púzdach uprostred v blízkosti výrezu v medi s vrcholovou teplotou okolo 92 °C. Vzhľadom na skutočnosť, že DPS nemá kovové jadro ani dodatočný chladič sa vyššie teploty predpokladali, prakticky je to otázne z hľadiska dlhodobej spoľahlivosti resp. životnosti LED, ostatné komponenty mali teploty v norme.



Obr. 3.6: Snímok DPS z termokamery spodná strana LED



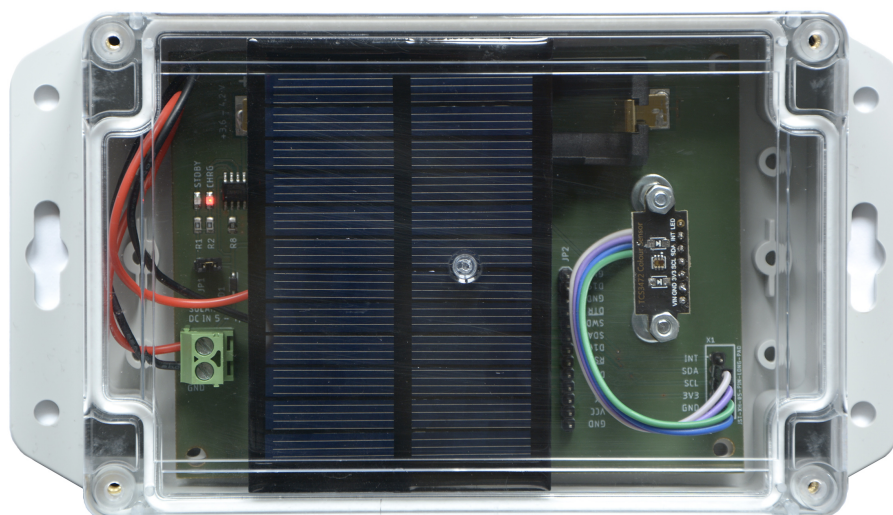
Obr. 3.7: Snímok DPS z termokamery vrchná strana

Zariadenie snímacého modulu (obrázok 3.8) je okrem samostatne vyvedenej zbernice pre snímač TCS34725 riešené ako univerzálny vývojový prostriedok s rozšírenou možnosťou zapojenia vlastného projektu užívateľa s osadeným modulom XBee 3, všetky vývody SoC sú dostupné na konektorových lištách s rozstupom 2,54 mm a vďaka tomu je to v niektorých prípadoch kompatibilnejšie riešenie ako ponúka DIGI na vlastných vývojových doskách pre XBee 3 SMT Grove [25] využívaných pri vývoji s menšími konektorovými lištami. Napájanie vetvy 3,3 V pre Xbee 3 funguje ako zdroj neprerušovaného napájania, pracuje aj v prípade s dostatočným osvetlením solárneho panelu bez akumulátoru (svieti **CHRG**) alebo samozrejme s akumulátorom bez panelu. Celé zariadenie na DPS rozmerov 115 x 86 mm je uzavreté

v mechanicky odolnej krabičke s krytím IP65 a dokáže teda pracovať v prostredí exteriéru kde môže napríklad vykonávať merania a činnosti na diaľku. Vďaka vysokej kapacite lítiového článku typu 18650 vydrží zariadenie pracovať aj bez solárneho napájania teoreticky niekoľko mesiacov prípadne rokov v závislosti od riešenia softvéru projektu. Solárny panel rozmerov 90 x 60 mm je upevnený na vrchný polykarbonátový diel krabičky, ako vidieť na obrázku 3.9. V krabičke je dostatok voľného priestoru na umiestnenie vlastných doplnkových zariadení užívateľa.



Obr. 3.8: Snímací modul bez vrchného krytu



Obr. 3.9: Snímací modul s krytom

## Konfigurácia XBee 3 cez DIGI XCTU

Na prácu s rádiovými modulmi DIGI XBee je určený od výrobcu voľne stiahnuteľný program XCTU. Ovládanie programu je intuitívne, pracovné okno je rozdelené do prostredia konfigurácie sieťových parametrov a periférií modulu, konzolového prostredia tvorby a čítania obsahu paketov a prostredia mapy celej siete. Okno konfigurácie poskytuje informačný popis ku každej položke, pri zmene parametru je nutné vykonať zápis jednotlivého parametru čím program pošle konfiguračný AT príkaz do zariadenia alebo pri úprave niekoľkých parametrov je možné zapísať všetky parametre.

Pamäť SoC obsahuje súborový systém kam sa dajú vložiť súbory programu v jazyku MicroPython cez terminál MicroPython REPL v XCTU alebo pomocou DIGI pluginu vo vývojovom prostredí PyCharm, ak užívateľ nezmení príslušné nastavenie program sa spúšťa automaticky po zapnutí zariadenia, obvykle skôr než zariadenie získa prístup do siete, komunikačné procesy SoC bežia nezávisle od užívateľského programu. Beh programu môže zvlášť v prípadoch s cyklickým spánkom interferovať s komunikáciou po zbernici UART, do miery kedy zariadenie nereaguje a nedá sa k nemu cez zbernicu pripojiť, nastal aj prípad kedy pri načítavaní konfiguračných hodnôt zo zariadenia do XCTU boli polia s hodnotami vyplnené dátami, ktoré program v XBee 3 opakovane odosielať cez zbernicu. Riešením je nastaviť vyššiu prenosovú rýchlosť, hodnota 115200 baudov funguje spoľahlivo. Pre vyššiu prenosovú rýchlosť zbernice bolo potrebné k mikrokontroléru svetidla osadiť externý oscilátor, interný neposkytoval dostatočnú presnosť na spoľahlivý prenos dát bez chýb.



## Konfigurácia Zigbee2MQTT

Protokol MQTT (z angl. Message Queuing Telemetry Transport) bol vytvorený spoločnosťou IBM v roku 1999 pôvodne pre účely získavania telemetrických dát senzorových sietí pomocou satelitnej komunikácie. V posledných rokoch nachádza využitie vo svete Internetu vecí IoT (z angl. Internet of Things) pre jeho jednoduchosť a dátovú nenáročnosť. Pracuje obvykle cez TCP/IP a zároveň dokáže podporovať aj iné typy sieťových protokolov, ako napríklad práve Zigbee, viac informácií a špecifikácií je možné nájsť napríklad na webových stránkach<sup>1</sup> MQTT.

Pre vzájomné prepojenie zariadení komunikujúcich protokolom Zigbee je potrebné sprevádzkovať vlastný MQTT server a nainštalovať sprostredkovateľa, napríklad Eclipse Mosquitto. Podrobné informácie k celému procesu sú dostupné na webových stránkach<sup>2</sup> projektu Zigbee2MQTT. V postupe návodu po kroku overenia funkčnosti pripojeného Zigbee adaptéru (napr. CC2531) sa pri inštalácii nodejs na ARMv6 (napríklad RPi 1) vyskytuje problém po zadaní príkazu na zistenie verzie (overenie inštalácie balíku), je potreba ideálne pred týmto krokom manuálne stiahnuť a nainštalovať node verzie 10.x (aktuálne v0.24.0) a problém sa tým vyrieši.

Hardvérové požiadavky na prevádzku MQTT serveru pre sieť Zigbee boli splnené použitím počítača Raspberry Pi (RPi) s operačným systémom Raspberry Pi OS (32-bit) v kombinácii s príslušným rádiovým zariadením podporujúcim protokol Zigbee na frekvencii 2,4 GHz slúžiacim na komunikáciu serveru so sieťou ako koordinátor alebo router. K serveru vytvorenému pre túto prácu bol použitý rádiový modul s obvodom Texas Instruments CC2531 kompatibilný s počítačovou zbernicou USB, do ktorého bol prostredníctvom vývodov Raspberry Pi nahraný funkčný set Z-Stack Home verzie 1.2 pre podporu Zigbee Home Automation (ZHA).

XBee 3 v zariadení svietidla a snímača funguje ako router alebo koncové zariadenie, ktoré sa do siete pripája, a pre kompatibilitu s MQTT sprostredkovateľom využívajúcim Z-Stack 1.2 je potreba nakonfigurovať Xbee 3 podľa návodu na webových stránkach<sup>3</sup> DIGI. XBee 3 štandardne pracuje s funkčným setom Zigbee 3.0, ZHA podporuje len set Zigbee PRO, ktorý je treba nastaviť. Je tiež možnosť namiesto Z-stack Home do rádiového modulu sprostredkovateľa inštalovať funkčný set Zigbee 3.0 (Z-Stack 3.0), výpočetne náročnejší a neotestovaný pre starší obvod CC2531.

Na obsluhu serveru stačí SSH spojenie bez grafického prostredia, napríklad prostredníctvom terminálového emulátoru PuTTY. MQTT je kompatibilné tiež s Home Assistant, komunikácia so serverom bola overovaná cez TCP/IP z iného stolného počítača so systémom Windows pomocou Node-RED, ktorého softvérový základ je potreba doinštalovať k serveru, a voľne dostupnej aplikácie MQTT Dash na systéme

---

<sup>1</sup>MQTT: <https://mqtt.org//>

<sup>2</sup>Projekt Zigbee2MQTT: <https://www.zigbee2mqtt.io/>

<sup>3</sup>ZHA: <https://www.digi.com/support/knowledge-base/zigbee-home-automation>

Android. Vytvorený server plne nahrádza Zigbee bránu, ktorá rovnako poskytuje prepojenie TCP/IP so sieťou Zigbee. Po vyriešení problémov s párovaním zariadení a sprostredkovateľom sa nepodarilo úspešne prijímať dáta zo snímacieho modulu do príslušnej rubriky serveru, ktorej obsah by bol následne odosielaný na adresu svietidla, server by navyše poskytoval možnosť ovládania svietidla pomocou mobilných zariadení alebo osobných počítačov prostredníctvom napríklad Node-RED.

## Záver

V tejto práci bol realizovaný modul interiérového biodynamického svietidla s nastaviteľnou bielou a samostatný modul pre snímač osvetlenia exteriéru. Svetelné parametre, riadenie LED a výsledné funkcie svietidla boli navrhované s ohľadom na fyziológiu človeka a rozšírené požiadavky kladené na moderné svietidlá.

Svietidlo pracuje v niekoľkých režimoch a je plne nastaviteľné v rozsahu svetelného toku korelovannej teploty svetla 2700 až 6500 K, maximálny kombinovaný teoretický svetelný tok 4950 lúmenov pri výkone 30 W a účinnosti osadzovaných LED 165 lm/W.

Aktuálne nastavený kombinovaný svetelný výstup kanálov v manuálne voliteľnom dennom alebo nočnom móde svietenia sa priebežne ukladá a po vypnutí alebo zmene režimu sa opäť načíta. Mód nočného svietenia pracuje len s teplým kanálom pre elimináciu nežiadúcich vplyvov modrej zložky studeného kanálu. Prechod medzi jednotlivými módmi je plynulý a každá zmena, zapnutie alebo vypnutie prebieha postupne. Svetidlo disponuje okrem nastavenia jasu a teploty bielej pokročilými možnosťami funkcií ako technológia stlmenia do teplej bielej (Dim to Warm), zvyšovanie jasu do studenej alebo úspora energie pri neprítomnosti osôb. Režim automatický pracuje s kalendárom a svietenie prirodzene prispôsobuje podľa času východu a západu slnka so svetelným výstupom orientovaným na priebeh cirkadiánneho rytmu.

Svietidlo má reálne maximálny výkon 25 W a svetelný tok podľa účinnosti diód teda 4150 lúmenov, pravdepodobne kôli osadeniu meracieho rezistoru prúdu s mierne vyšším odporom. Výstupné napätie regulátoru kanálu studenej bielej je 29,1 V a úbytok napätia meracieho rezistoru 351 mV, výstup kanálu teplej bielej 29,5 V a úbytok rezistoru 345 mV. Celková maximálna spotreba prúdu je 720 mA pri napájaní z 36 V.

Teplotné vrcholy sú lokalizované na púzdrach LED, v nasledovnej iterácii zariadenia by bol výkon efektívne rozložený do väčšieho počtu LED s nižším výkonom a tým by sa znížila vrcholová teplota pri maximálnom výkone. Rozšírenie spájacích plôch LED by malo rovnako pozitívny vplyv na zníženie maximálnych dosiahnutých lokálnych teplôt. Meď v okolí LED, ktorá nie je priamo na spájaciu plochu napojená pomáha odvodu tepla, ale priame spojenie väčšej samozrejme izolovanej oblasti so spájacou plochou LED by znížilo tepelný odpor prechodu z púzdra LED do okolia.

Pre účely vzájomného prepojenia prvkov systému a ďalších možností ovládania svietidla v domácej Zigbee sieti bol vytvorený MQTT server na počítači Raspberry Pi na základe projektu Zigbee2MQTT pomocou sprostredkovateľa Eclipse Mosquitto a fyzického rádiového adaptéru vytvárajúceho vlastnú Zigbee sieť topológie Mesh. Funkčnosť samotného MQTT serveru bola otestovaná z osobného počítača a mobilného zariadenia. Moduly XBee sa dokázali úspešne so serverom spárovať,

nepodarilo sa však finálne sprevádzkovať získavanie a ukladanie dát. Výpis komunikácie serveru s novým zariadením v sieti sa nachádza v prílohe.

Problém s bonusovou funkciou svietenia podľa podmienok exteriéru nenarúša plnohodnotnú funkciu samotného biodynamického svietidla, jedná sa o stúpajúcu prémiovú schopnosť svietidiel s potenciálnym využitím v uzavretých miestnostiach bez okien a tak bude v budúcnosti venovaná pozornosť sprevádzkovaniu spojenia vytvorených zariadení prostredníctvom MQTT alebo iným spojovacím prostriedkom.

Snímací modul s napájaním z akumulátoru dobíjaného solárnym panelom integrovaným v priehľadnom kryte z polykarbonátu je uzavretý v krabicike s krytím IP65 a má rozšírené využitie pre zapojenie vlastného projektu užívateľa.



# Literatúra

- [1] FUKSA Antonín. *Světlo a biologické hodiny* [online]. 2010 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42567.pdf>>.
- [2] BLUME Christine, GARBAZZA Corrado, SPITSCHAN Manuel. *Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood* [online]. 2019 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6751071/>>.
- [3] GOOLEY Joshua, RAJARATNAM Shantha, BRAINARD George. KRONAUER Richard CZEISLER Charles, LOCKLEY Steven. *Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light* [online]. 2010 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20463367/>>.
- [4] BOMMEL W. J. M., BELD G. J., OUYEN M. H. F. *Industrial lighting and productivity* [online]. 2002 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/interiores/ilumina%e7%e3o%20industrial/industrial\\_lighting\\_and\\_productivity%5b1%5d.pdf](https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/interiores/ilumina%e7%e3o%20industrial/industrial_lighting_and_productivity%5b1%5d.pdf)>.
- [5] LIANG Bo. HE Shiyong, TÄHKÄMÖ Leena, TETRI Eino. *Lighting for road tunnels: The influence of CCT of light sources on reaction time* [online]. 2019 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://www.researchgate.net/publication/337372075\\_Lighting\\_for\\_Road\\_Tunnels\\_The\\_Influence\\_of\\_CCT\\_of\\_Light\\_Sources\\_on\\_Reaction\\_Time](https://www.researchgate.net/publication/337372075_Lighting_for_Road_Tunnels_The_Influence_of_CCT_of_Light_Sources_on_Reaction_Time)>.
- [6] *All about Solar Energy / Solar Energy Environmental Impact* In: Electrical A2Z [online]. [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://electricala2z.com/renewable-energy/solar-energy-solar-energy-environmental-impact/>>.
- [7] LING J. Samuel, SANNY Jeff, MOEBS William. *University Physics Volume 3* [online]. Rice University, Houston, Texas, 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>>.

- [8] REJMAN Martin. *Luminiscenční vlastnosti fosforů ve vysoce výkonných LED aplikacích* [online]. Fyzikální ústav AV ČR, 2016 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/83758/140054002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- [9] *PlanckianLocus.png* [online]. 2005 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PlanckianLocus.png>>.
- [10] VALENCIA J. B., GIRALDO F. L., BONILLA J. V. *Calibration method for Correlated Color Temperature (CCT) measurement using RGB color sensors* [online]. 2013 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6644921>>.
- [11] BAXANT P., DRÁPELA J. *Světelná technika*, elektronické skriptum č. EEN609, Přednášky a cvičení. Brno: 2006. s. 1-82.
- [12] BOUŠEK J., KOSINA P., MOJROVA B. *Elektrotechnické součástky*, elektronické skriptum. Brno: 2015.
- [13] THOMSON Stuart. *Time-Resolved Electroluminescence Spectroscopy of a White Light Emitting Diode* [online]. 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://www.researchgate.net/publication/326353685\\_Time-Resolved\\_Electroluminescence\\_Spectroscopy\\_of\\_a\\_White\\_Light\\_Emitting\\_Diode](https://www.researchgate.net/publication/326353685_Time-Resolved_Electroluminescence_Spectroscopy_of_a_White_Light_Emitting_Diode)>.
- [14] KRAMES Michael R., SCHEKIN Oleg B., MUELLER-MACH Regina, MUELLER Gerd O., ZHOU Ling, HARBERS Gerard, CRAFTORD George M. *Status and Future of High-Power Light-Emitting* [online]. 2007 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z : <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4211194>>.
- [15] AMS. *TCS3200 Programmable Color Light-to-Frequency Converter* [online]. amsDatasheet, 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3200\\_DS000107\\_3-00.pdf/c53d702f-63aa-eda1-745f-d513aa4f535f](https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3200_DS000107_3-00.pdf/c53d702f-63aa-eda1-745f-d513aa4f535f)>.
- [16] AMS. *TCS3472 Color Light-to-Digital Converter with IR Filter* [online]. amsDatasheet, 2020 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3472\\_DS000390\\_3-00.pdf/6fe47e15-e32f-7fa7-03cb-22935da44b26](https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3472_DS000390_3-00.pdf/6fe47e15-e32f-7fa7-03cb-22935da44b26)>.

- [17] AMS. *TCS3430 Color and ALS Sensor* [online]. amsDatasheet, 2020 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3430\\_DS000464\\_5-00.pdf/7c8385e3-b950-2719-b70d-db3e8140b7db](https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3430_DS000464_5-00.pdf/7c8385e3-b950-2719-b70d-db3e8140b7db)>.
- [18] AMS. *AS73211 XYZ True Color Sensor with I<sup>2</sup>C Interface* [online]. amsDatasheet, 2020 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/36005/AS73211\\_DS000556\\_3-01.pdf/a65474c0-b302-c2fd-e30a-c98df87616df](https://ams.com/documents/20143/36005/AS73211_DS000556_3-01.pdf/a65474c0-b302-c2fd-e30a-c98df87616df)>.
- [19] AMS. *DN40-Rev 1.0 – Lux and CCT* [online]. amsDatasheet, 2013 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/80162/ColorSensors\\_AN000166\\_1-00.pdf/c0b4a4b4-9948-f2a7-f8a1-36a8208bd0a9](https://ams.com/documents/20143/80162/ColorSensors_AN000166_1-00.pdf/c0b4a4b4-9948-f2a7-f8a1-36a8208bd0a9)>.
- [20] AMS. *AS7220 Calibrated CCT and Lumen Maintenance Smart Lighting Manager* [online]. amsDatasheet, 2017 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://ams.com/documents/20143/36005/AS7220\\_DS000509\\_1-00.pdf/a80ea461-cdac-d6ed-3671-1185b22fd6d3](https://ams.com/documents/20143/36005/AS7220_DS000509_1-00.pdf/a80ea461-cdac-d6ed-3671-1185b22fd6d3)>.
- [21] Consonance Electronic *MPTT Li-ion Battery Charger IC CN3791* [online]. Consonance Datasheet, Rev 1.0 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z :  
<<http://www.consonance-elec.com/pdf/datasheet/DSE-CN3791.pdf>>.
- [22] Advanced Monolithic Systems *TC4056A Linear Charging IC* [online]. AMS Datasheet, [cit. 2020-05-20]. Dostupné z :  
<<https://datasheetspdf.com/pdf-file/1309140/AMS/TC4056A/1>>.
- [23] STMicroelectronics. *STM32F103x8* [online]. 2015 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z : <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>>.
- [24] DIGI. *Digi XBee 3 Zigbee 3.0* [online]. DIGI Datasheet [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<[https://www.digi.com/resources/library/data-sheets/ds\\_xbee-3-zigbee-3](https://www.digi.com/resources/library/data-sheets/ds_xbee-3-zigbee-3)>.
- [25] DIGI. *XBee Grove Development Board* [online]. DIGI Datasheet, 2016 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z :  
<<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001457-13.pdf>>.

- [26] Infineon. *ILD8150/E high side buck LED driver IC with hybrid dimming* [online]. Infineon Application Note, Rev 1.1, 2021 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z :  
<[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_reference\\_design\\_REF\\_ILD8150\\_DC\\_1.5A\\_LightingICs\\_LED\\_driver-ApplicationNotes-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c0168c39bfda86810](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_reference_design_REF_ILD8150_DC_1.5A_LightingICs_LED_driver-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c0168c39bfda86810)>.

# Zoznam symbolov a skratiek

<b>ABS</b>	Acrylonitrile Butadiene Styrene, plast akrylonitril butadien styrén
<b>ARM</b>	Advanced RISC Machine, architektúra ARM
<b>CCR</b>	Constant Current Regulation, regulácia konštantného prúdu
<b>CCT</b>	Correlated Color Temperature, korelovaná farebná teplota
<b>CIE</b>	Commission internationale de l'Eclairage, Medzinárodná komisia pre osvetľovanie
<b>CRI</b>	Color Rendering Index, index podania farieb
<b>DPS</b>	Doska Plošných Spojov
<b>EMC</b>	ElectroMagnetic Compatibility, elektromagnetická kompatibilita
<b>ipRGC</b>	intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells, intrinzicky fotocitlivé sietnicové gangliové bunky
<b>IR</b>	Infra Red, infračervené žiarenie
<b>LED</b>	Light Emitting Diode, elektroluminiscenčná dioda
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking, sledovanie bodu maximálneho výkonu
<b>MQTT</b>	Message Queuing Telemetry Transport, protokol MQTT
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation, pulzne-šírková modulácia
<b>REPL</b>	Read Evaluate Print Loop, terminál REPL
<b>RGBC</b>	Red Green Blue Clear, červená, zelená, modrá, číra
<b>RTC</b>	Real Time Clock, hodiny reálneho času
<b>SCN</b>	Suprachiasmatic Nuclei, suprachiasmatické jadrá
<b>SMD</b>	Surface Mount Device, zariadenie povrchovej montáže
<b>SoC</b>	System on Chip, systém na čipe
<b>SSH</b>	Secure SHell, zabezpečený protokol pre vzdialený prístup
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol, primárny prenosový protokol/protokol sieťovej vrstvy

<b>THT</b>	Through Hole Technology, technológia skrz dosku
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, univerzálne asynchrónne sériové rozhranie
<b>UV</b>	Ultra Violet, ultrafialové žiarenie
<b>YAG</b>	Yttrium Gluminium Garnet, yttrium aluminium granát
<b>ZHA</b>	Zigbee Home Automation

# Zoznam príloh

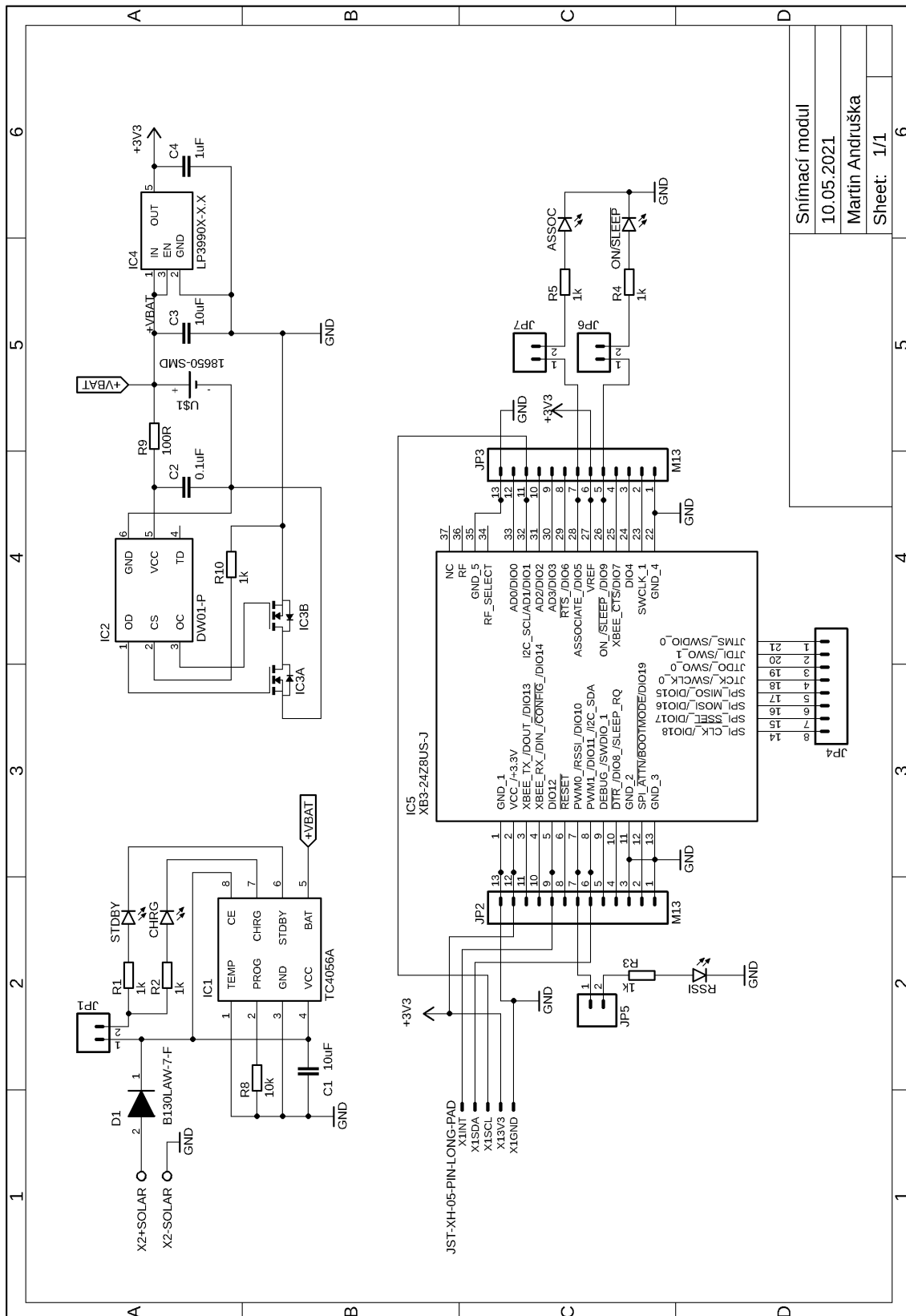
<b>A</b>	<b>Schémy</b>	<b>60</b>
A.1	Schéma zapojenia snímacieho modulu . . . . .	60
A.2	Schéma zapojenia riadiaceho obvodu . . . . .	61
A.3	Schéma zapojenia LED . . . . .	62
<b>B</b>	<b>Podklady na výrobu DPS</b>	<b>63</b>
B.1	Snímací modul - TOP, M1:1 . . . . .	63
B.2	Snímací modul TOP - osadzovací plán . . . . .	63
B.3	Snímací modul - BOT, M1:1 . . . . .	64
B.4	Svietidlo - TOP, M1:1 . . . . .	65
B.5	Svietidlo TOP - osadzovací plán . . . . .	66
B.6	Svietidlo - BOT, M1:1 . . . . .	67
B.7	Svietidlo - BOT - osadzovací plán . . . . .	68
<b>C</b>	<b>Zoznamy súčiastok</b>	<b>69</b>
C.1	Zoznam súčiastok - snímací modul . . . . .	69
C.2	Zoznam súčiastok - svietidlo . . . . .	70
<b>D</b>	<b>Výpis z serveru</b>	<b>71</b>



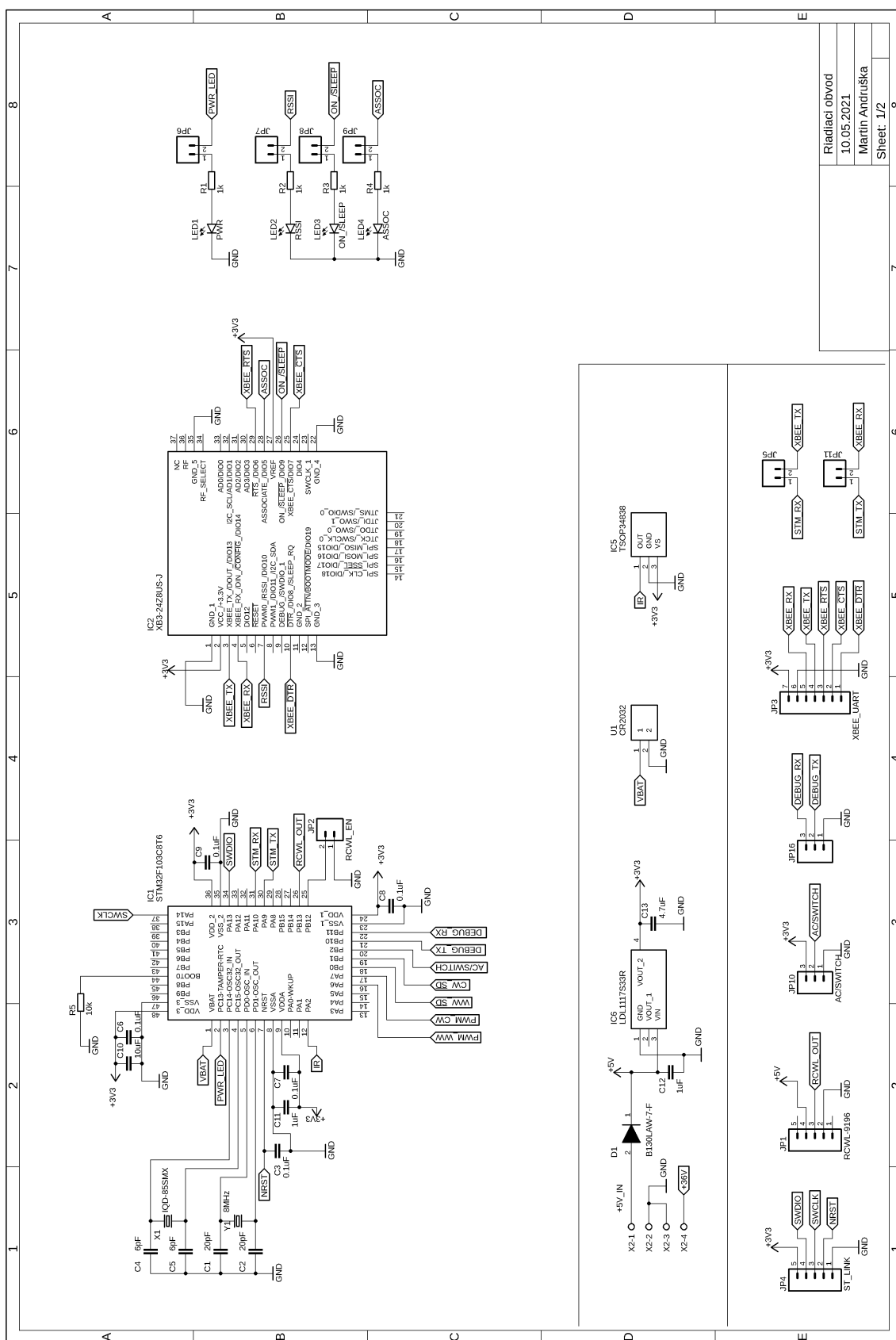


# A Schémy

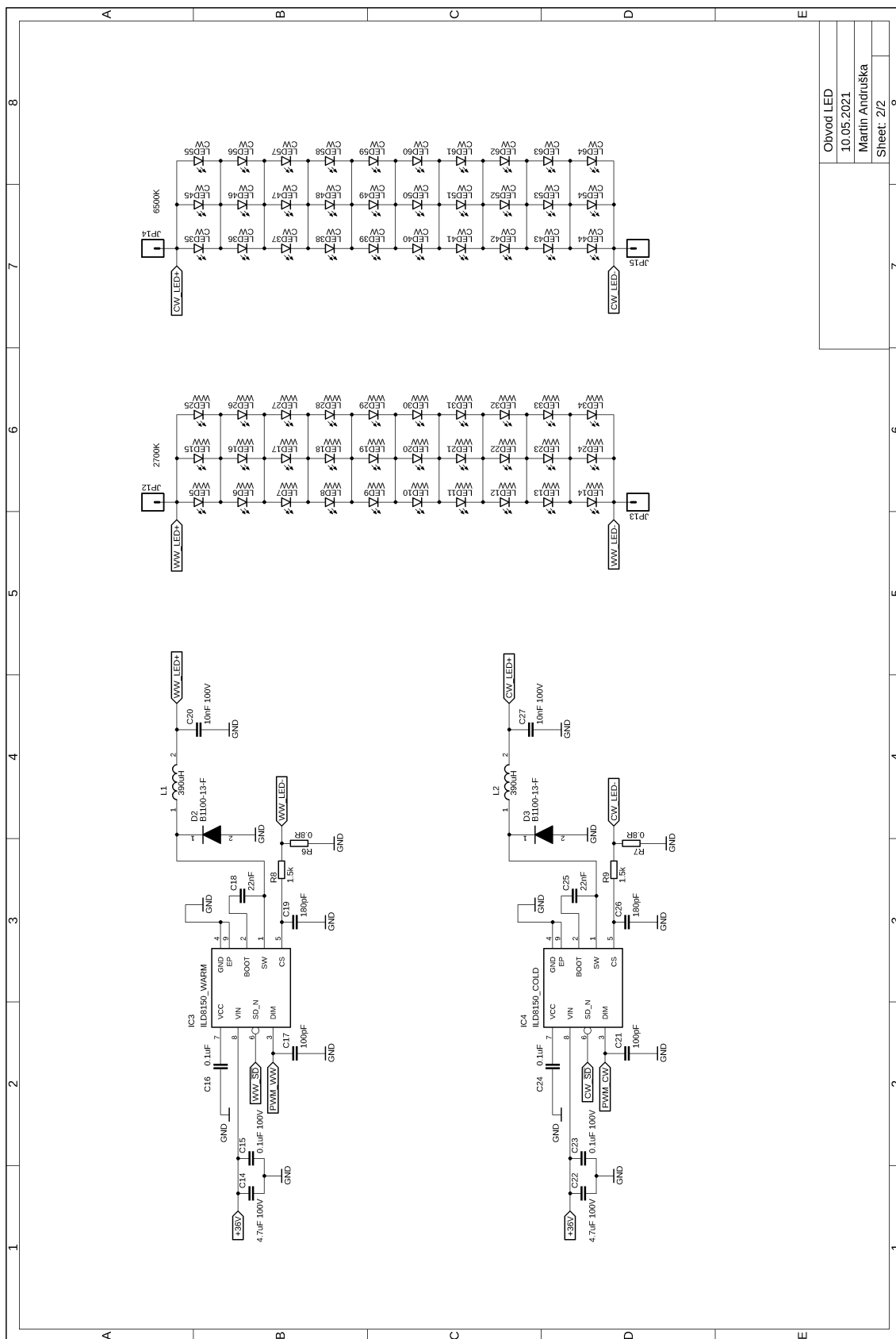
## A.1 Schéma zapojenia snímacieho modulu



## A.2 Schéma zapojenia riadiaceho obvodu



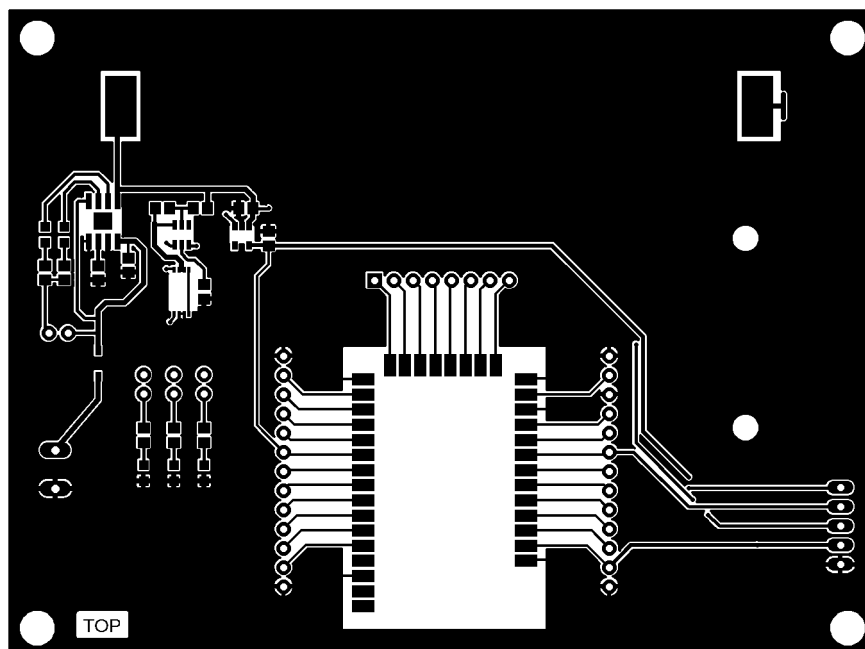
## A.3 Schéma zapojenia LED



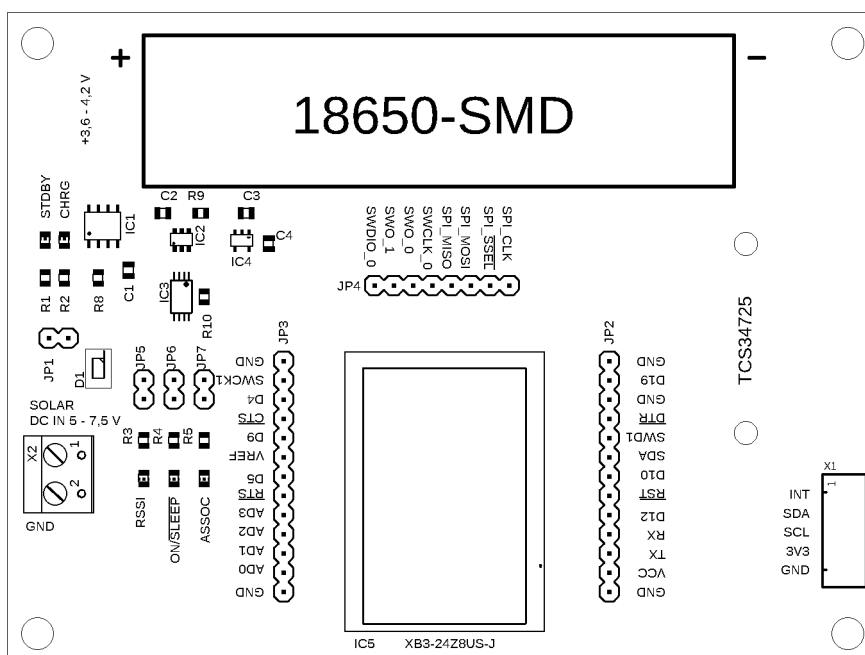
Obvod LED	8
10.05.2021	7
Martin Andruška	6
Sheet 2/2	5

## B Podklady na výrobu DPS

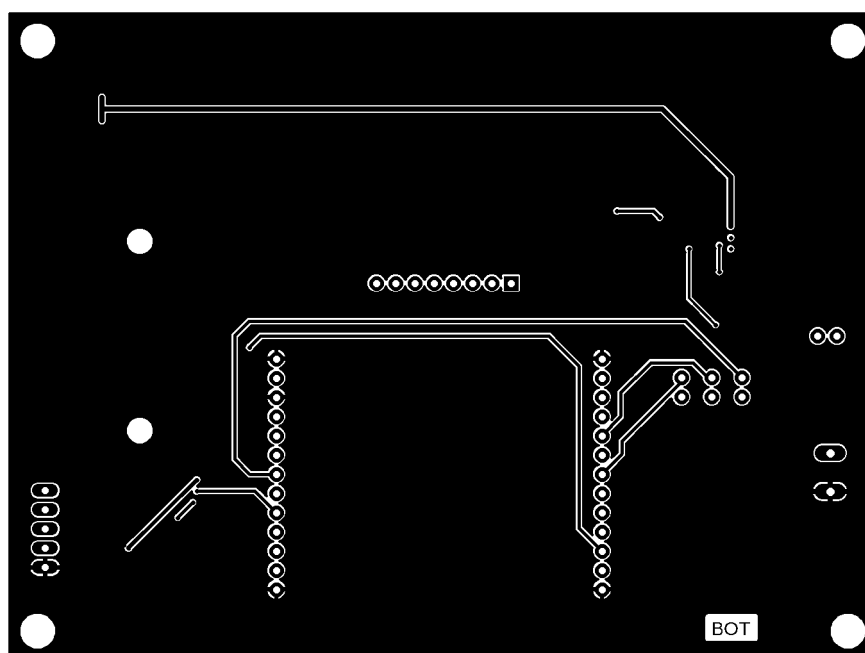
### B.1 Snímací modul - TOP, M1:1



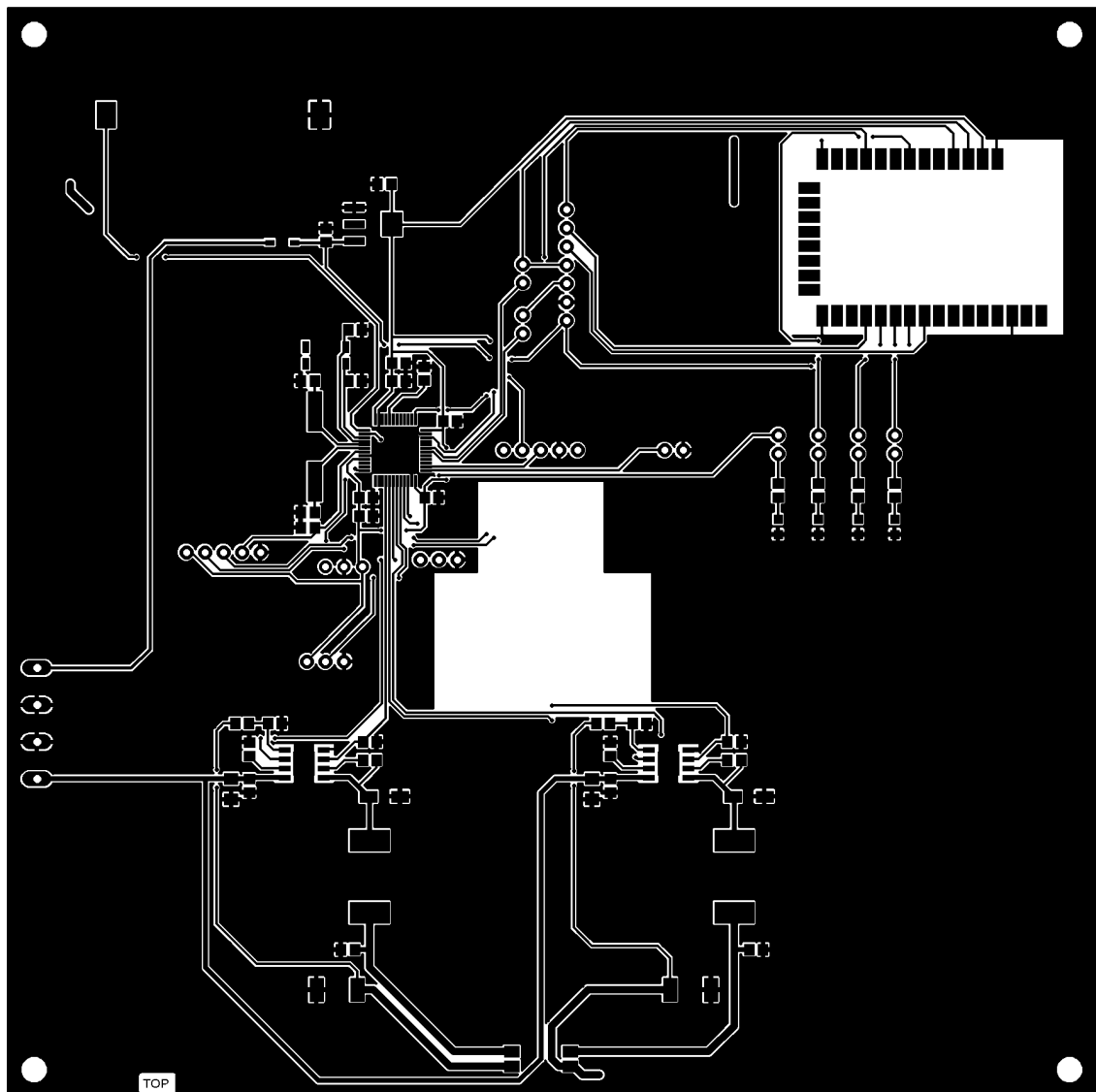
### B.2 Snímací modul TOP - osadzovací plán



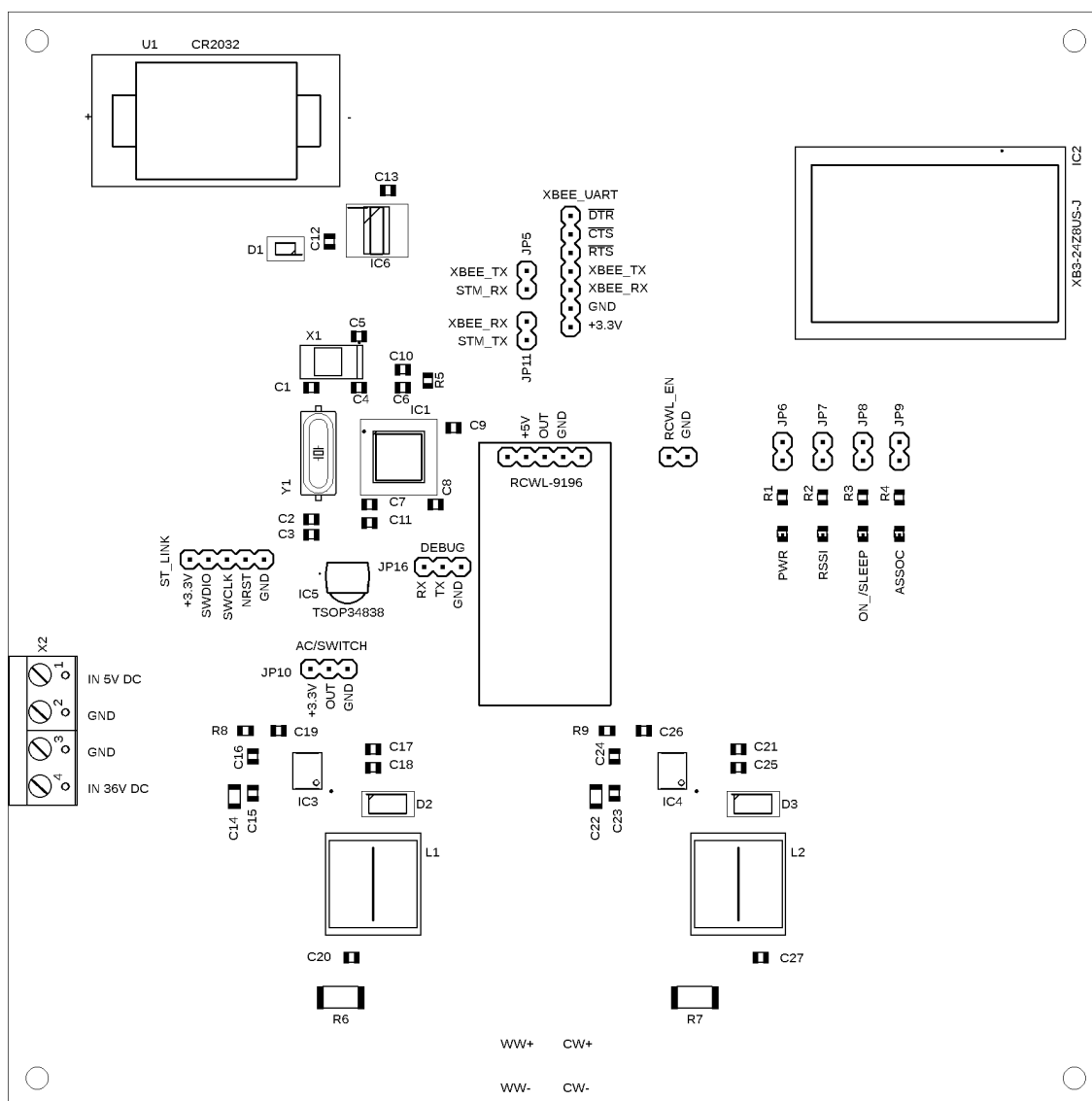
### B.3 Snímací modul - BOT, M1:1



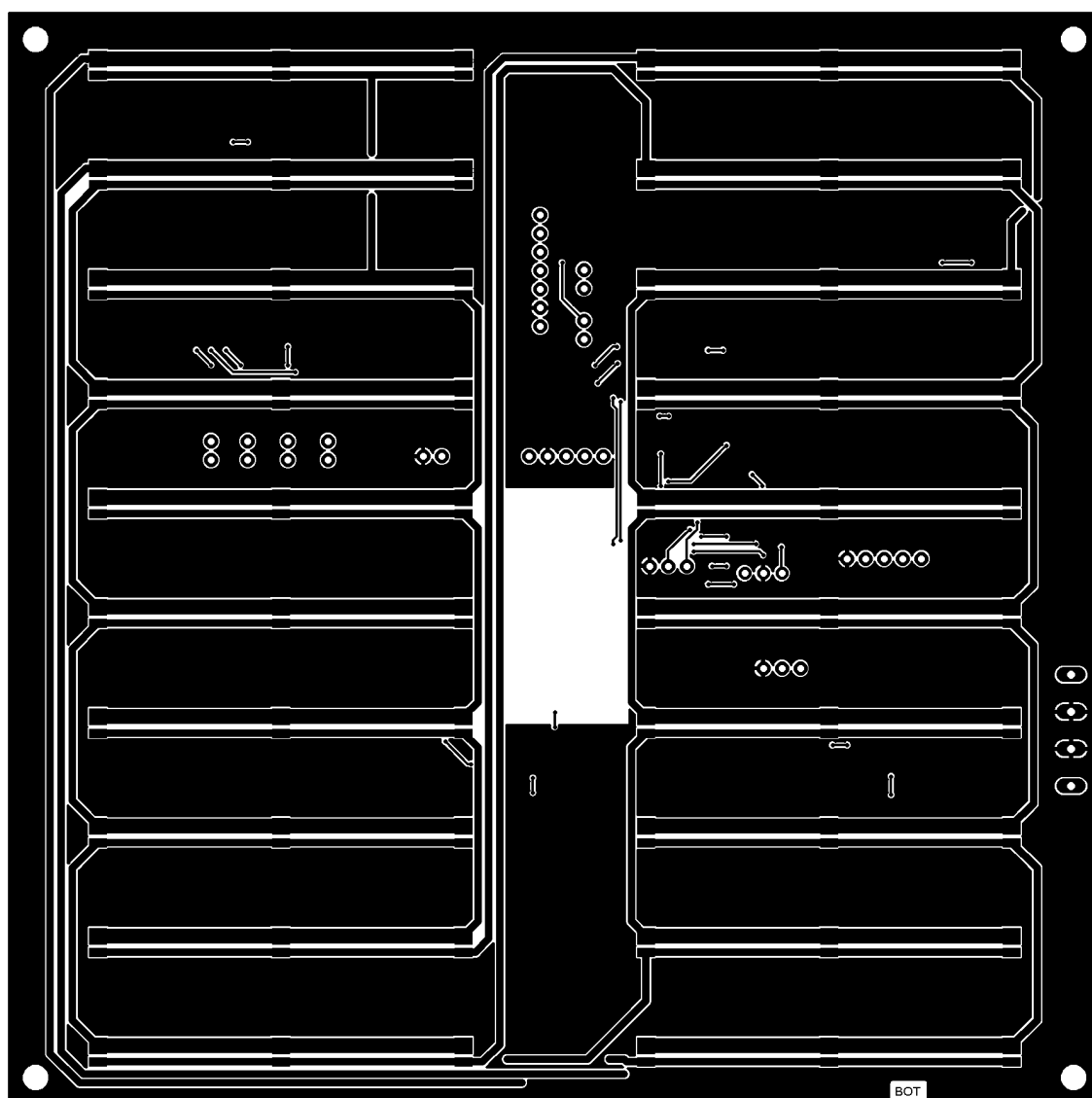
## B.4 Svietidlo - TOP, M1:1



## B.5 Svietidlo TOP - osadzovací plán

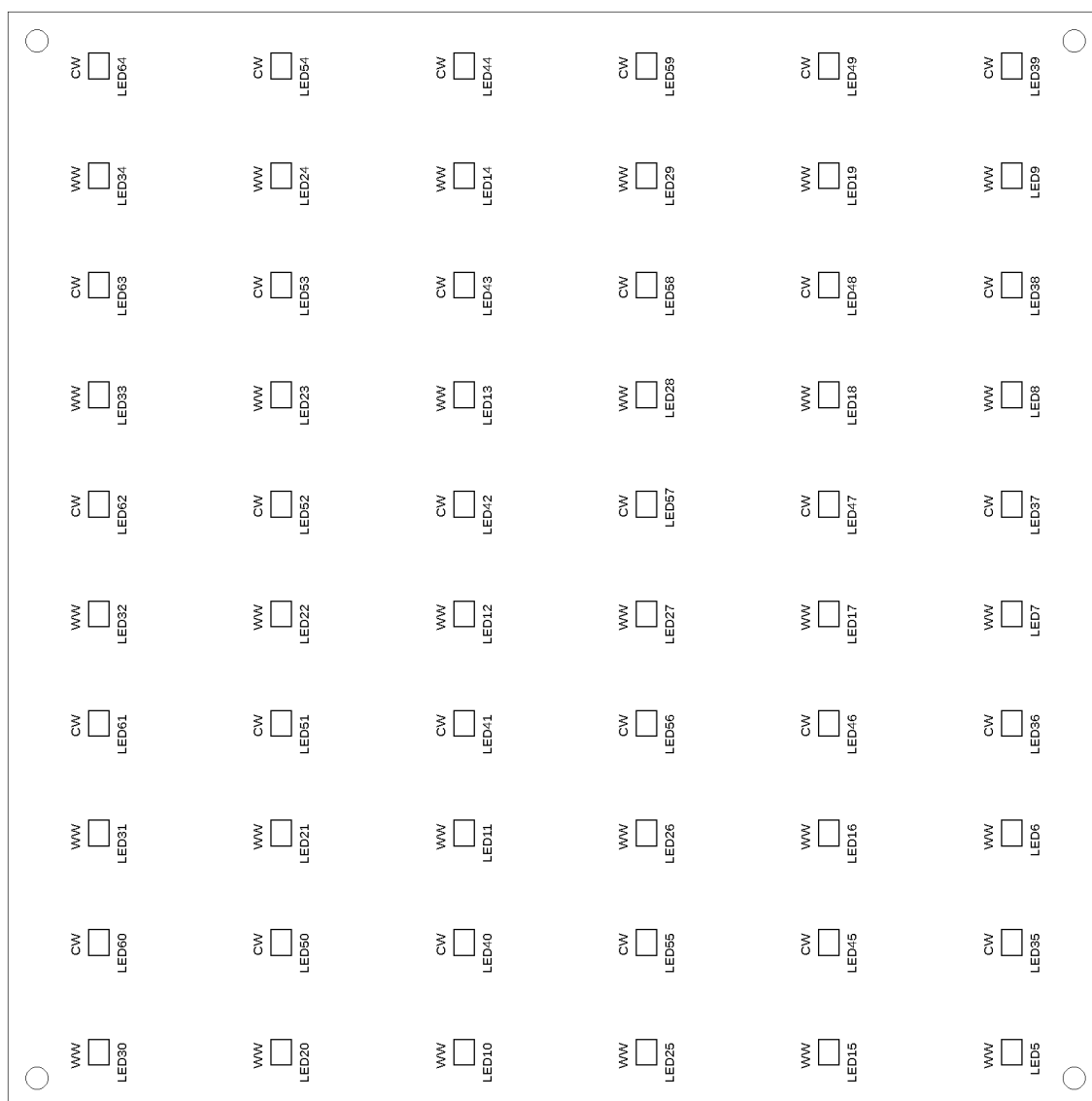


## B.6 Svietidlo - BOT, M1:1





## B.7 Svietidlo - BOT - osadzovací plán



## C Zoznamy súčiastok

### C.1 Zoznam súčiastok - snímací modul

Názov	Hodnota	Popis
C1, C3	10uF	0805
C2	0,1uF	0805
C4	1uF	0805
R1, R2, R3, R4, R5, R10	1k	0805
R8	10k	0805
R9	100R	0805
D1	B130LAW-7-F	SOD123
LED1, LED3, LED4, LED5, LED6	kontrolka	0805
IC1	TC4056A	SOIC-8
IC2	DW01-P	SOT23-6L
IC3	FS8205A	TSSOP-8
IC4	LP3990MF-3.3	SOT23-5
IC5	XB3-24Z8US-J	Xbee-3 SMT
JP1, JP5, JP6, JP7	2-pin	konektorová lišta 2.54 mm
JP2, JP3	13-pin	konektorová lišta 2.54 mm
JP4	8-pin	konektorová lišta 2.54 mm
US1	18650	úchyt 18650-SMD
X1	5-pin	JST-XH-05 2.54mm

## C.2 Zoznam súčiastok - svietidlo

Názov	Hodnota	Popis
C1, C2	20pF	0805
C4, C5	6pF	0805
C3, C6, C7, C8, C9, C16, C24	0,1uF	0805
C10	10uF	0805
C11, C12	1uF	0805
C13	4,7uF	0805
C14, C22	4,7 uF 100V	1206
C15, C16, C23, C24	0,1uF 100V	0805
C17, C21	100pF	0805
C18, C25	22nF	0805
C19, C26	180pF	0805
C20, C27	10nF 100V	0805
R1, R2, R3, R4	1k	0805
R5	10k	0805
R6, R7	0,8R 1%	2512 rezistor merací
R8, R9	1,5k	0805
D1	B130LAW-7-F	SOD123
D2, D3	B1100-13-F	SMA
L1, L2	390uH 1,1A	SMD 12,5x12,5mm
LED1, LED2, LED3, LED4	kontrolka	0805
LED5, ..., LED34	LM281B+ RA90 2700K	2835
LED35, ..., LED64	LM281B+ RA90 6500K	2835
IC1	STM32F103C8T6	LQFP-48
IC2	XB3-24Z8US-J	Xbee-3 SMT
IC3,IC4	ILD8150E	SOIC-8
IC5	TSOP34838	THT
IC6	LDL1117-S33-R	SOT-223
X1	IQD-85SMX	kryštál
X2	W237-04P	konektor 5mm
Y1	8MHz	kryštál
U1	CR2032	úchyt CR2032 SMD
JP1, JP4	5-pin	konektorová lišta 2.54 mm
JP3	7-pin	konektorová lišta 2.54 mm
JP2, JP5, JP6, JP7, JP8, JP9, JP11	2-pin	konektorová lišta 2.54 mm
JP10, JP11	3-pin	konektorová lišta 2.54 mm

## D Výpis z serveru

Výpis D.1: Výpis párovania XBee 3 pod názvom Lampa s MQTT serverom

```
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: Device 'Lampa' joined
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/event', payload '{"data":{"friendly_name":"
  Lampa"},"ieee_address":"0x0013a200417ad3a9"},"type":"
  device_joined"}'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: Starting interview
of 'Lampa'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/event', payload '{"data":{"friendly_name":"
  Lampa"},"ieee_address":"0x0013a200417ad3a9"},"status":"started
 "},"type":"device_interview"}'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/log', payload '{"message":{"friendly_name":"
  Lampa"},"type":"device_connected"}'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/log', payload '{"message":"interview_started
  ","meta":{"friendly_name":"Lampa"},"type":"pairing"}'
Zigbee2MQTT:debug 2021-04-15 16:02:02: Device 'Lampa'
announced itself
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/event', payload '{"data":{"friendly_name":"
  Lampa"},"ieee_address":"0x0013a200417ad3a9"},"type":"
  device_announce"}'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:02: MQTT publish: topic
'zigbee2mqtt/bridge/log', payload '{"message":"announce",
"meta":{"friendly_name":"Lampa"},"type":"device_announced"}'
Zigbee2MQTT:info 2021-04-15 16:02:03: Successfully
interviewed 'Lampa', device has successfully been paired
Zigbee2MQTT:warn 2021-04-15 16:02:03: Device 'Lampa'
with Zigbee model 'undefined' and manufacturer name
'undefined' is NOT supported, please follow https://www.
zigbee2mqtt.io/how\_tos/how\_to\_support\_new\_devices.html
```